ENDEAVOUR

Revue trimestrielle publiée en cinq langues et destinée
à tenir registre du progrès des sciences au
service du genre humain

VOLUME XX Octobre 1961 NUMÉRO 80

SOMMAIRE

061.22(100):5
Article de Tête: Un Conseil scientifique international 175

547.473.2:577.15
Chimie organique et biologique de l'acide mévalonique — A. F. WAGNER, A.B., M.A., Ph.D., et K. FOLKERS, B.S., Ph.D. 177

550.311:551.241
Le «Mohole» — Sir EDWARD BULLARD, M.A., Sc.D., F.R.S. 188

612.843.3:535.7
Les quanta de lumière et la vision — M. H. PIRENNE, M.A., Ph.D., Dr.Sc. 197

92:552.3
Sir James Hall, Bt. (1761–1832) — V. A. EYLES, D.Sc., F.R.S.E., F.G.S. 210

581.524.441:553.97:551.345
Formations observées à la surface des tourbières boréales — H. SJÖRS, Fil. dr. 217

539.124
Le positronium — F. F. HEYMANN, B.Sc.(Eng.), Ph.D.(Eng.) 225

049.3
Revue des livres 232

Brèves notices bibliographiques 235

Notes biographiques sur les collaborateurs 236

Livres reçus .. .. Couverture III

Rédacteur en chef: TREVOR I. WILLIAMS, M.A., B.Sc., D.Phil., F.R.I.C.
Rédacteurs adjoints: G. N. J. BECK, B.Sc., A.M.I.E.E. (*Pour les éditions étrangères*)
W. A. OSMAN, B.Sc., M.Sc., A.R.C.S.

Imperial Chemical Industries Limited, Millbank, Londres, S.W.1
Prière d'adresser toute correspondance à la rédaction, North Block, Thames House, Millbank, Londres, S.W.1

Un Conseil scientifique international

Selon la tradition, la Science n'a pas de frontières et le libre échange d'idées entre savants de différents pays a toujours été considéré comme étant d'importance transcendante. Ce principe, qui l'emportait naguère sur les plus vives antipathies, voire même l'état de guerre, entre nations, persiste encore malgré les entraves apportées aux échanges. Actuellement, presque tous les domaines importants de la science donnent lieu à des recherches de caractère international, et c'est au profit de tous les pays en cause que se font les échanges de découvertes et d'idées nouvelles, par le truchement des revues scientifiques, des conférences, ou des communications entre individus. Ces moyens suffisent en pratique, d'autant plus qu'une organisation plus rigide présenterait bien des inconvénients: en science, comme dans toute autre entreprise humaine, les rapports personnels sont précieux. Il y a néanmoins des cas de coopération internationale où une répartition bien nette des tâches à accomplir est indispensable.

La neuvième Assemblée Générale du Conseil International des Unions Scientifiques (ICSU), qui eut lieu à Londres le mois dernier, a fait ressortir l'importance croissante d'organismes officiels de collaboration internationale en ce qui concerne certaines entreprises scientifiques. C'est ainsi que l'Année Géophysique Internationale (A.G.I.) organisée par un comité spécial de l'ICSU, a été de loin la plus importante opération scientifique qui ait jamais été exécutée en coopération internationale: soixante-sept pays y participèrent et plus de deux mille stations d'observation, dont cinquante-sept dans l'Antarctique, furent établies. C'est là évidemment un effort d'une ampleur exceptionnelle, mais il fait voir jusqu'où peut aller l'entente internationale et démontre qu'il peut y avoir coopération amicale sur le terrain scientifique entre pays de régimes politiques très divergents.

L'A.G.I. a également fait ressortir avec éclat la capacité de l'ICSU d'entreprendre une tâche de grande envergure. On peut donc faire confiance à l'ICSU et lui fournir les moyens d'étendre ses activités. Une telle extension s'impose, car depuis la fin de la dernière guerre presque tous les domaines de la science ont connu un développement prodigieux et, parallèlement, la coopération interdisciplinaire ainsi que la collaboration entre savants de différents pays se sont accrues sensiblement. Cette fructueuse tendance se maintient manifestement et l'existence d'un organisme organisateur efficace et bien pourvu ne peut que l'encourager. L'ICSU lui-même n'est pas chargé de rassembler ni de dépenser des fonds de recherche; il ne fait que coordonner les travaux des autres organismes et les faire entrer dans le cadre approprié. L'ICSU «catalyse» ainsi des travaux qui, sans lui, n'auraient pu être effectués.

L'ICSU a eu de modestes commencements qui remontent à la deuxième moitié du XIXe siècle. Il existait alors un certain nombre d'associations hautement spécialisées; certaines étaient intergouvernementales et la plupart étaient d'inspiration allemande. En 1900, elles furent réunies sous le nom d'Association Internationale des Académies, mais l'influence allemande y prédominait grâce à la présence des académies de Berlin, Gœttingue, Heidelberg, Leipzig et Vienne. La première Guerre Mondiale mit fin à ses activités. Par la suite fut fondé le Conseil International de la Recherche, sur l'initiative commune de l'Académie des Sciences de Paris, de la *Royal Society* de Londres et de la *National Academy of Sciences* de Washington. Ce conseil coordonnait les travaux de diverses unions scientifiques, notamment celles de chimie, de biologie et de physique; mais, au début, il n'était en fait guère plus international que l'ancienne Association des Académies, car il ne représentait que les pays alliés. En 1931 le Conseil, reconstitué, devint le Conseil International des Unions Scientifiques dont les buts et la constitution s'accordaient bien mieux avec son titre. Il a pour objet précis de coordonner les travaux des organisations nationales membres et des diverses unions internationales. On accorda à chacune de ces dernières une autonomie complète, et les fonctions du Conseil ressemblaient à celles d'un parlement fédéral: il réglait les questions d'un caractère commun, mais n'intervenait pas dans les travaux des unions individuelles.

Dès la fin de la deuxième Guerre Mondiale le Conseil reprend ses travaux encore une fois interrompus. Ses deux objectifs principaux seront désormais, d'abord de coordonner et faciliter l'action des unions, puis de servir de centre de coordination de ses organisations nationales membres. Actuellement les quatorze unions se répartissent en unions «générales» et unions «spécialisées», chaque catégorie possédant son propre mode de scrutin et de représentation. Les unions générales sont celles d'Astronomie, de Géodésie et

Géophysique, de Chimie pure et appliquée, et celle des Sciences biologiques. Les unions spécialisées sont celles de Sciences radiologiques, de Cristallographie, de Sciences physiologiques, de Biochimie, et celle de l'Histoire et la Philosophie de la Science.

Tandis que l'on réorganisait l'ICSU, un nouvel organisme international s'occupant de sciences prenait naissance: l'Unesco, qui diffère essentiellement de l'ICSU. L'Unesco est une organisation inter-gouvernemental dont les membres sont des Etats; tandis que l'ICSU est une association d'académies des sciences nationales ou de conseils nationaux de recherche, d'une part, et d'unions scientifiques internationales, d'autre part. Cela n'empêche que les deux organismes se chevauchent quelque peu et c'est pour éviter cet inconvénient que leur domaine respectif a été défini dans un accord renouvelé annuellement depuis 1946. L'Unesco fournit à l'ICSU une subvention annuelle et envoie des représentants aux réunions du Comité Exécutif et de l'Assemblée Générale de l'ICSU qui, en retour, fournit à l'Unesco sur demande des avis spécialisés.

Les activités actuelles de l'ICSU sont considérables, et on ne peut en esquisser ici que les plus importants aspects. On trouvera toutefois de plus amples détails dans l'article qu'a publié dans ENDEAVOUR (**18**, 88, 1959) l'ancien Secrétaire Général de l'ICSU, le regretté Sir Harold Spencer Jones. L'ICSU organise les grandes entreprises internationales d'observations et d'expériences et en outre s'occupe activement de la coordination des résumés d'ouvrages scientifiques et entretient un système de services dits «permanents».

Le Conseil commença à s'intéresser aux résumés en 1949, lors de la Conférence Unesco tenue à Paris sur ce sujet. Cette même année, à la suite de la réunion de son Assemblée Générale à Copenhague, l'ICSU nomma une commission conjointe, laquelle se chargea à partir de 1950 de la rédaction des résumés d'ouvrages de physique, tâche qui auparavant incombait à l'Unesco. En 1951 le Bureau des Résumés Analytiques de l'ICSU fut fondé, qui travaille actuellement en collaboration étroite avec *Physics Abstracts*, le Bulletin Signalétique, *Physikalische Berichte* et l'Institut d'Information Scientifique de Moscou, son principe directeur étant que pour chaque discipline scientifique il ne devrait y avoir qu'un seul bulletin de résumés dans chaque langue. Par la suite, ces travaux se sont étendus au domaine de la chimie et présentement le Bureau coordonne l'œuvre des principaux bulletins d'extraits d'ouvrages chimiques, rédigés en anglais, français, allemand et russe.

La Fédération des Services Astronomiques et Géophysiques, fondée en 1959, réunit maintenant onze services relevant des unions Astronomique, Géodésique et Géophysique, et Radio-scientifique. Ces services comprennent notamment un bureau international de l'heure, un bureau gravimétrique, un service des marées terrestres et un service pour l'émission en code de données solaires, géomagnétiques et autres données géophysiques.

Il y a en outre quatre comités spéciaux de l'ICSU: ceux de géophysique, de recherches océaniques, de recherches antarctiques et de recherches spatiales. La tâche la plus importante du comité de géophysique est actuellement d'utiliser à fond les résultats de l'A.G.I. tout en posant les bases d'autres entreprises semblables, notamment une étude du magnétisme mondial, prévue pour 1964–66 — prochaine période d'activité solaire minimale — et une exploration du manteau terrestre. Parmi les entreprises du comité spécial des recherches océaniques figure une étude détaillée de l'Océan Indien qui aura lieu en 1962–63 et à laquelle participeront une vingtaine de navires hydrographiques fournis par dix nations. Trois motifs ont déterminé le choix de l'Océan Indien: d'abord c'est le moins connu des océans, puis les vents et les courants peuvent y être étudiés tout au long d'un cycle complet de moussons au cours duquel il y a revirement total de la direction des vents, et enfin la zone de pêche de cet océan est d'une importance économique considérable pour les pays qu'il baigne. Le comité spécial des recherches spatiales, fondé en 1958 s'intéresse aux questions d'un caractère fondamental plutôt qu'aux problèmes technologiques de construction et de lancement de satellites et de sondes.

Pour mener à bien ces diverses tâches, il faut une organisation et des fonds suffisants. Or, les revenus de l'ICSU ne dépassent pas £115 000 (320 000 dollars). C'est parce que la plupart des travaux ont été entrepris à titre bénévole que de telles réalisations ont pu être effectuées à si peu de frais. La direction centrale, à La Haye, est très modeste. Etant donné toutefois l'importance des tâches envisagées, le personnel et les ressources de l'ICSU sont devenus manifestement insuffisants. De nos jours la recherche internationale coûte des centaines de millions de livres sterling, et il faut espérer que l'ICSU obtiendra facilement les fonds relativement minimes qu'il lui faut pour maintenir et étendre ses services.

Chimie organique et biologique de l'acide mévalonique

par A. F. WAGNER et K. FOLKERS

Depuis son identification en 1956, l'acide mévalonique a été reconnu comme étant une substance clé dans la biosynthèse d'une large gamme de très importants produits naturels, dont les stéroïdes, les caroténoïdes et les terpènes. Sa découverte est donc d'une importance scientifique majeure. Dans cet article, des pionniers en la matière passent en revue les recherches qui ont conduit à la reconnaissance de l'acide mévalonique comme facteur de croissance, à son isolement, à l'identification de sa structure et de sa configuration, à sa synthèse, et à l'élucidation de son rôle dans un certain nombre de processus biosynthétiques.

DÉCOUVERTE ET ISOLEMENT

De nombreux chercheurs ont utilisé des matériaux tels que les solubles desséchés de distillerie pour l'étude des facteurs qui favorisent la croissance des animaux. A. F. Novak, S. M. Hauge et C. W. Carrick [1] signalèrent en 1947 que ces matériaux renfermaient un facteur non identifié nécessaire à la croissance du poussin, et, l'année suivante, un concentrat préparé à partir de cette source fut désigné sous l'appellation de «vitamine B_{13}» [2]. Des rapports selon lesquels un concentré de vitamine B_{13} favoriserait la croissance chez le poussin et le rat stimulèrent les études dans d'autres laboratoires.

En 1956, H. R. Skeggs et collaborateurs [3] soumirent un concentré de «vitamine B_{13}» à une distribution à contre-courant et examinèrent l'action des diverses fractions ainsi obtenues sur la croissance microbienne. Ils trouvèrent que certaines fractions favorisaient fortement la croissance, en milieu sans acétate, de *Lactobacillus acidophilus* (souche ATCC 4963). Il fut montré que cette activité était distincte de celle de l'acide lipoïque, facteur de croissance obtenu à partir du foie, et de tous les autres composés; ces études aboutirent à la découverte d'un nouveau facteur remplaçant l'acétate, qui fut désigné sous le nom d'acide mévalonique. Dans ces études, l'activité sur la croissance des concentrés de «vitamine B_{13}» chez le poussin ne fut pas confirmée; W. H. Ott et collaborateurs [4] considérèrent comme négatifs ou au mieux équivoques les tests de croissance chez le poussin avec les concentrés. La purification de la nouvelle substance remplaçant l'acétate fut donc poursuivie en utilisant des tests fondés sur la croissance de *L. acidophilus* ATCC 4963 dans un milieu sans acétate.

Pour démontrer que cette activité n'était pas liée à un composé connu ou à une combinaison de composés connus, plus de 150 composés ayant une importance biologique furent examinés; aucun ne montra une activité comparable sur la croissance de *L. acidophilus* en l'absence d'acétate. La démonstration que ce facteur n'était pas une forme combinée de l'acide lipoïque fut particulièrement significative, parce que l'on a montré que ce composé est présent dans les concentrés. Quand on eut montré que les essais microbiologiques de l'acide lipoïque et du «nouveau facteur» n'étaient pas modifiés après hydrolyse avec de l'acide sulfurique normal, on conclut que le matériel étudié ne contenait pas de conjugué de l'acide lipoïque sensible aux acides et inaccessible aux microorganismes. Le fait que l'on ait pu retrouver presque quantitativement l'activité dans diverses études de fractionnement fut également significatif, étant donné qu'il se serait produit des pertes incalculables d'activité si la réponse microbienne avait été due à une combinaison de composés plutôt qu'à un seul. Des expériences ultérieures sur des concentrés du nouveau facteur démontrèrent son activité sur la croissance de *Lactobacillus bifidus*, *L. bulgaricus* et *Thermobacterium acidophilus*.

G. Tamura [5] trouva un facteur de croissance dans l'alcool de riz japonais (saké) et aussi dans des milieux de culture où avaient poussé des organismes comme *Aspergillus*, *Penicillium*, *Monilia*, *Willia* et *Lactobacillus*. Le facteur fut appelé acide hiochique par suite de son activité sur la croissance des «véritables bactéries hiochis», *Lactobacillus homohiochi* et *L. heterohiochi*. Sur la base des spectres infra-rouges et des activités microbiologiques identiques des composés purs obtenus à

partir des deux sources, G. Tamura et K. Folkers [6] rapportèrent plus tard que les acides hiochique et mévalonique étaient identiques.

L. D. Wright et collaborateurs [7] obtinrent des concentrés hautement purifiés d'acide mévalonique à partir de solubles desséchés de distillerie. La substance active fut extraite du matériel à l'aide de méthanol, et cette fraction soluble dans le méthanol fut partiellement purifiée par extraction continue au chloroforme. La fraction soluble dans le chloroforme fut purifiée par chromatographie (sur Superfiltrol), et le matériel inerte d'une série d'éluats choisis fut précipité par de l'éthanol. Quand on fit passer une solution aqueuse du concentré à travers une résine échangeuse de cations (Dowex-50), le composé actif passa très rapidement, immédiatement derrière le solvant, et laissa derrière lui de nombreuses impuretés. Des fractions choisies de ce stade furent alors neutralisées, et le facteur fut adsorbé sur une résine échangeuse d'anions (Dowex-1). L'élution sélective de la résine avec de l'acide formique 0,05 N aboutit à une récupération presque quantitative de l'activité. Ces deux stades de purification par échange d'ions aboutirent à une concentration quintuple. Après plusieurs distributions successives à contre-courant entre les phases d'un mélange éthanol/eau/chloroforme des fractions les plus riches, le facteur fut obtenu sous la forme d'une huile limpide, dont les courbes de distribution pondérale et d'activité montrèrent qu'il était presque pur.

DÉTERMINATION DE LA STRUCTURE

En solution aqueuse, le composé nouvellement isolé se comporta comme un acide; la courbe de titration potentiométrique d'une solution aqueuse avec un alcali monta rapidement puis dériva, d'une manière caractéristique des lactones. Le spectre d'absorption dans l'infra-rouge fut également compatible avec une fonction lactone. En solution chloroformique, on observa des bandes d'absorption qui indiquaient la présence de groupes hydroxyle et ester. En solution dans la morpholine, la bande d'absorption (5,78 μ) correspondant à la fonction ester diminua lentement d'intensité pendant 48 heures, et une nouvelle bande (6,1 μ) correspondant à un ion carboxylate apparut et augmenta lentement d'intensité. Un tel comportement est typique des lactones, et, sur la base de la vitesse d'ouverture de l'anneau, on supposa que la fonction était une δ-lactone plutôt qu'une γ-lactone.

On convertit l'huile hautement purifiée en benzhydrylamide cristalline avant d'entreprendre des études plus poussées sur la structure. Ce dérivé contenait un groupe C-méthyle et un groupe hydroxyle que l'on pouvait acyler. L'analyse élémentaire de la benzhydrylamide et du monoacétate correspondant indiqua la formule moléculaire $C_6H_{12}O_4$ pour le composé actif et $C_6H_{10}O_3$ pour la lactone correspondante. Etant donné que les données spectrales et de titration avaient déjà indiqué que le facteur lui-même était un acide δ-hydroxylé, il apparut que la mise en place d'un groupe méthyle et d'un autre

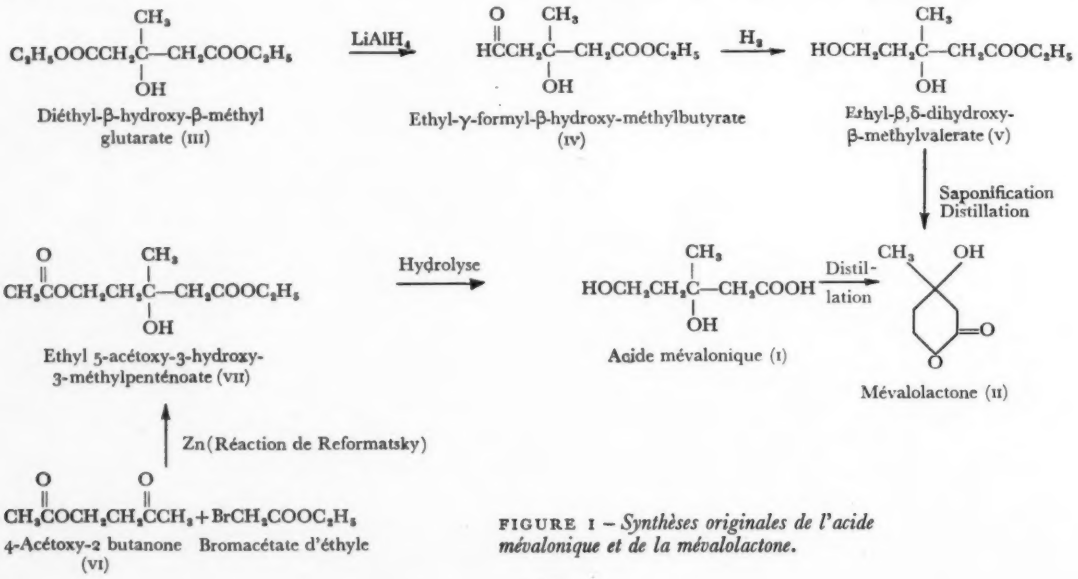


FIGURE 1 – *Synthèses originales de l'acide mévalonique et de la mévalolactone.*

groupe hydroxyle sur la chaîne carbonée satisferait la composition élémentaire et compléterait l'élucidation de la structure.

Ni la lactone ni la benzhydrylamide correspondante ne réagirent avec les periodates alcalins ni avec les hypoïodites, montrant que la molécule ne contient pas de groupe γ-hydroxyle adjacent ou un substituant α-hydroxyéthyl. La position α du groupe hydroxyle fut éliminée à cause du pK de l'acide; par conséquent, la position β était la seule possibilité restante pour le groupe hydroxyle.

On assigna également la position β au groupe méthyle. La position δ fut éliminée des possibilités en tant que siège du groupe méthyle parce que l'essai à l'iodoforme fut négatif. Des trois possibilités restantes, on choisit la position β parce que le comportement du composé lors de l'acétylation s'expliquait le mieux par la présence d'un groupe alcool tertiaire.

Sur cette base, D. E. Wolf et collaborateurs [8, 9] assignèrent à la forme acide des facteurs la structure acide β, δ-dihydroxy-β-méthyl-valérique (I) et à la forme lactone la structure β-hydroxy-β-méthyl-valérolactone (II). Le nom générique d'acide mévalonique fut par suite utilisé pour le nouveau facteur biologiquement actif.

SYNTHÈSES DE L'ACIDE DL-MÉVALONIQUE

Cette conclusion structurale fut vérifiée par une synthèse non équivoque [9]. Les stades successifs (III, IV, V, II) sont montrés à la figure 1. L'activité microbiologique de la mévalolactone synthétique fut la moitié de celle de la substance optiquement active obtenue à partir des solubles de distillerie.

Une synthèse fondamentale améliorée et très utile par C. H. Hoffman et collaborateurs [10] fut fondée sur la condensation de la 4-acétoxy-2-butanone (VI, figure 1) avec le bromacétate d'éthyle. L'hydrolyse du produit (VII) donna un mélange équilibré de l'acide dihydroxylé et de la lactone. La lactone pure fut isolée par distillation; l'on obtint l'acide pur sous forme du sel de *bis* N,N'-dibenzyléthylènediammonium après avoir fait réagir le mélange acide-lactone avec un excès de N,N'-dibenzyléthylènediamine en milieux semi-aqueux.

SYNTHÈSES DE L'ACIDE DL-MÉVALONIQUE RADIOACTIF

L'étude du rôle de l'acide mévalonique dans la biosynthèse des polyisoprénoïdes nécessita de l'acide mévalonique marqué, et on utilisa les synthèses suivantes.

J. W. Cornforth et collaborateurs [11] synthétisèrent la 2-^{14}C-mévalolactone à partir de 4-acétoxy-2 butanone (VI) et de 2-^{14}C-bromacétate d'éthyle (figure 1). La synthèse de la 4-^{14}C-mévalolactone [12] utilisa les réactions clés des deux synthèses précédentes de la mévalolactone (figure 2).

Une excellente synthèse de la 3',4-^{13}C-mévalolactone fut introduite [12] à partir de dikétène doublement marqué (X) (figure 3).

SYNTHÈSE DE L'ACIDE (+)-MÉVALONIQUE

La forme biologiquement active de l'acide est dextrogyre. Elle a été obtenue par résolution chimique [13], et l'acide (−)-mévalonique a été obtenu par résolution enzymatique du racémate [14]. L'acide (+)-mévalonique a été préparé directement par synthèse enzymatique [15, 16];

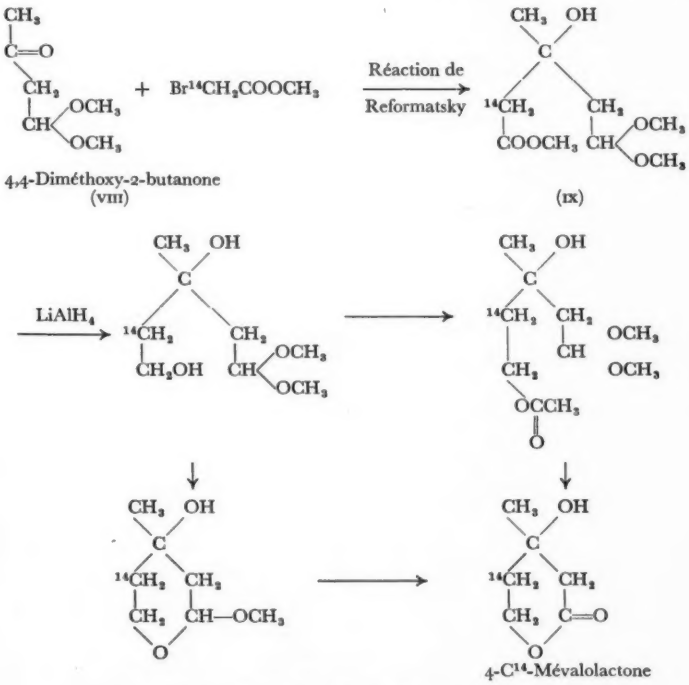


FIGURE 2 – *Synthèse de la 4-^{14}C-mévalolactone* [12].

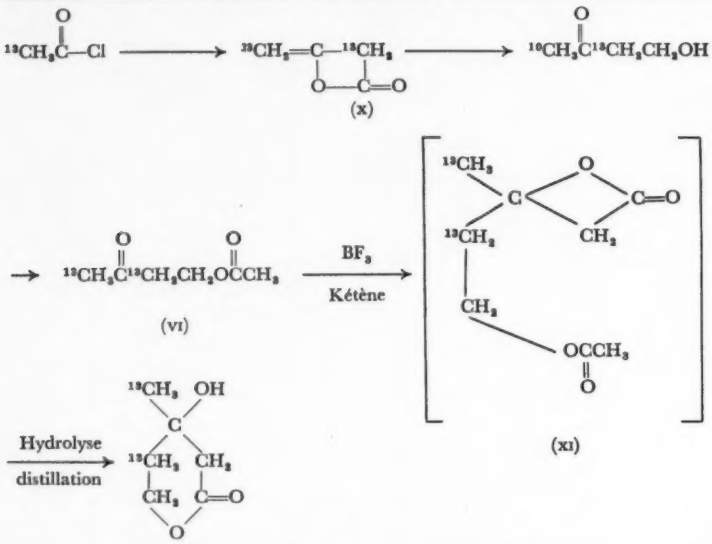


FIGURE 3 – *Synthèse de la* 3′,4-^{13}*C-mévalolactone* [12].

70% de l'isomère (+) du racémate furent isolés sous forme d'acide phospho-(+)-mévalonique après phosphorylation enzymatique sélective avec la kinase mévalonique en présence d'ATP.

U. Henning, E. M. Möslein et F. Lynen [16] ont effectué la synthèse de l'acide (+)-mévalonique à partir du β-méthylcrotonyl coenzyme A par la succession de réactions montrée ci-dessous, qui fut effectuée en deux étapes. La réaction de carboxylation fut réalisée dans la première, mais l'hydratation et la réduction furent combinées pour empêcher le clivage du β-hydroxy-β-méthylglutaryl coenzyme A en acéto-acétate par une aldolase présente dans le système enzymatique.

β-méthylcrotonyl CoA + ATP + CO_2 ⟶
β-méthylglutaconyl CoA + ADP + P_i
β-méthylglutaconyl CoA + H_2O ⟶
β-hydroxy-β-méthylglutaryl CoA
β-hydroxy-β-méthylglutaryl CoA
+ 2TPNH + $2H^+$ ⟶
acide (+)-mévalonique + $2TPN^+$.

CONFIGURATION DE L'ACIDE MÉVALONIQUE

L'acide (+)-mévalonique a été apparenté au (+)-glycéraldéhyde au moyen de l'acide quinique (figure 4, XII). M. Eberle et D. Arigoni [17] convertirent l'acide quinique (XII) en la forme «non naturelle» (+) de la mévalolactone par la succession de réactions montrée à la figure 4. Etant donné que ces réactions donnèrent la *S*-(+)-lactone biologiquement inactive (XIII), les formes biologiquement actives du composé sont désignées par *R*-(−)-mévalolactone et acide *R*-(+)-mévalonique. Une confirmation supplémentaire de cette conclusion fut obtenue à partir d'une comparaison de la courbe de dispersion optico-rotatoire de la benzhydrylamide dérivée de la *S*-(+)-lactone (XIII) avec celle rapportée pour la benzhydrylamide dérivée de l'antipode de l'acide mévalonique.

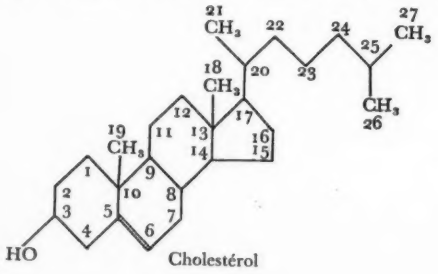
L'ACIDE MÉVALONIQUE DANS LA BIOSYNTHÈSE

Biosynthèse des stérols

La biosynthèse des stérols et des terpènes a été étudiée ces deux dernières décennies. Chronologiquement, des points de repère importants dans la recherche de la voie de la biosynthèse (figure 5) ont été les découvertes que l'acétate, le squalène, le lanostérol, l'acide mévalonique et le pyrophosphate d'isopentényle étaient des précurseurs effectifs du cholestérol.

Acétate

Le rôle de l'acétate en tant que précurseur du cholestérol fut établi dans des expériences d'alimentation animale et par utilisation d'acétate marqué *in vitro*. K. Bloch et D. Rittenberg [18] observèrent que l'ingestion d'acide deutéroacétique conduisait chez la souris et le rat à la formation de deutérocholestérol; la distribution du deutérium montra que l'acétate était un précurseur à la fois de la chaîne latérale et du noyau. D'autres données excluent les acides propionique, butyrique et succinique, ainsi que les acides gras supérieurs, comme les acides palmitique et stéarique, de toute participation directe à la biosynthèse. Après addition de $^{13}CH_3{}^{14}COOH$ et de $^{14}CH_3{}^{13}COOH$ à des homogénats de foie de rat: le rapport $^{13}C/^{14}C$ du cholestérol biosynthétique



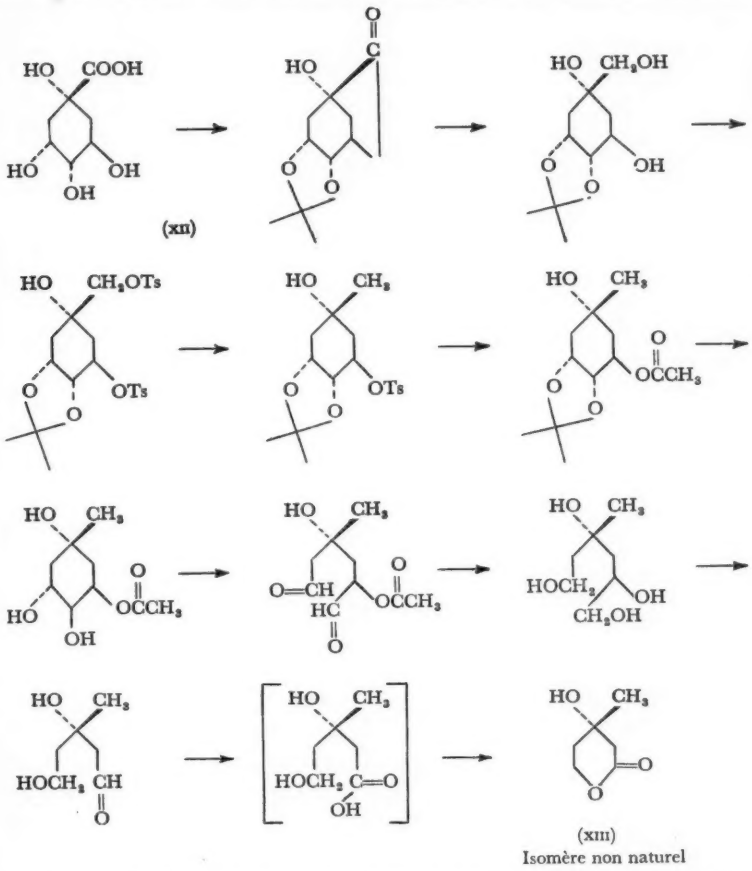


FIGURE 4 – *Synthèse stéréosélective de la (+)-mévalolactone à partir de l'acide quinique* [17]. (*Ts = Toluène-sulfonate.*)

formé montra qu'environ 20% de groupes méthyles de plus que de groupes carboxyles avaient été incorporés [19]. On supposa donc qu'il se produisait un certain degré de décarboxylation au cours de la biosynthèse. La dégradation sélective du cholestérol radioactif confirma que l'acétate sert de précurseur à la fois du noyau et de la chaîne latérale. J. W. Cornforth et collaborateurs [20] déterminèrent la distribution du carbone radioactif dans le cholestérol biosynthétisé à partir de $^{14}CH_3COOH$ et de $CH_3{}^{14}COOH$ par des coupes de foie de rat; 15 atomes de carbone du stérol dérivaient du groupe méthyle et 12 du groupe carboxyle de l'acétate.

La dégradation sélective du cholestérol biosynthétique montra que les atomes de carbone 2, 4, 6, 8, et 10 étaient dérivés du groupe carboxyle et les atomes de carbone 1, 3, 5 et 19 étaient dérivés du groupe méthyle de l'acétate [20]. J. Wuersch, R. L. Huang et K. Bloch [21] montrèrent que toute la chaîne latérale de la molécule du stérol dérivait de l'acétate. Après addition d'acétate marqué à un système *in vitro* et dégradations sélectives de la chaîne latérale, il se révéla que les atomes de carbone 21, 22, 24, 26 et 27 dérivaient du groupe méthyle de l'acétate et que les atomes de carbons 20, 23 et 25 dérivaient du groupe carboxyle. Quand les chercheurs envisagèrent la dérivation biosynthétique des atomes de carbone de la chaîne latérale sur la base du mécanisme de Bonner et Arreguin [22] (figure 6) pour la conversion de l'acétate en isoprène, ils conclurent que des unités à 5 atomes de carbone apparentées à l'isoprène participent à la biosynthèse du cholestérol à partir de l'acétate.

Le schéma de réaction montré à la figure 6 fut encore étayé quand il fut démontré par R. O. Brady et S. Gurin [23] que l'acéto-acétate marqué sur le méthyle était incorporé dans le cholestérol par les coupes de foie de rat sans dégradation en unités à deux atomes de carbone. Etant donné que l'acéto-acétate joue un rôle de précurseur du cholestérol, il fut suggéré [24] que l'étape suivante de la biosynthèse pourrait être la condensation de l'acéto-acétyl coenzyme A avec l'acétyl coenzyme A pour former la β-hydroxy-β-méthylglutaryl coenzyme A (XIV). Ils démontrèrent que le DPN, l'ATP et la coenzyme A étaient nécessaires à l'incorporation d'acétate, de pyruvate et d'acétyl coenzyme A marqués dans le cholestérol par des extraits aqueux de foie de rat sans particules, et observèrent également la conversion de l'acétate marqué en β-hydroxy-β-méthylglutarate dans le même extrait. H. Rudney [25] montra que la radioactivité de l'acétate marqué était incorporée dans les acides β-hydroxy-β-méthylglutarique et β,β-diméthylacrylique par

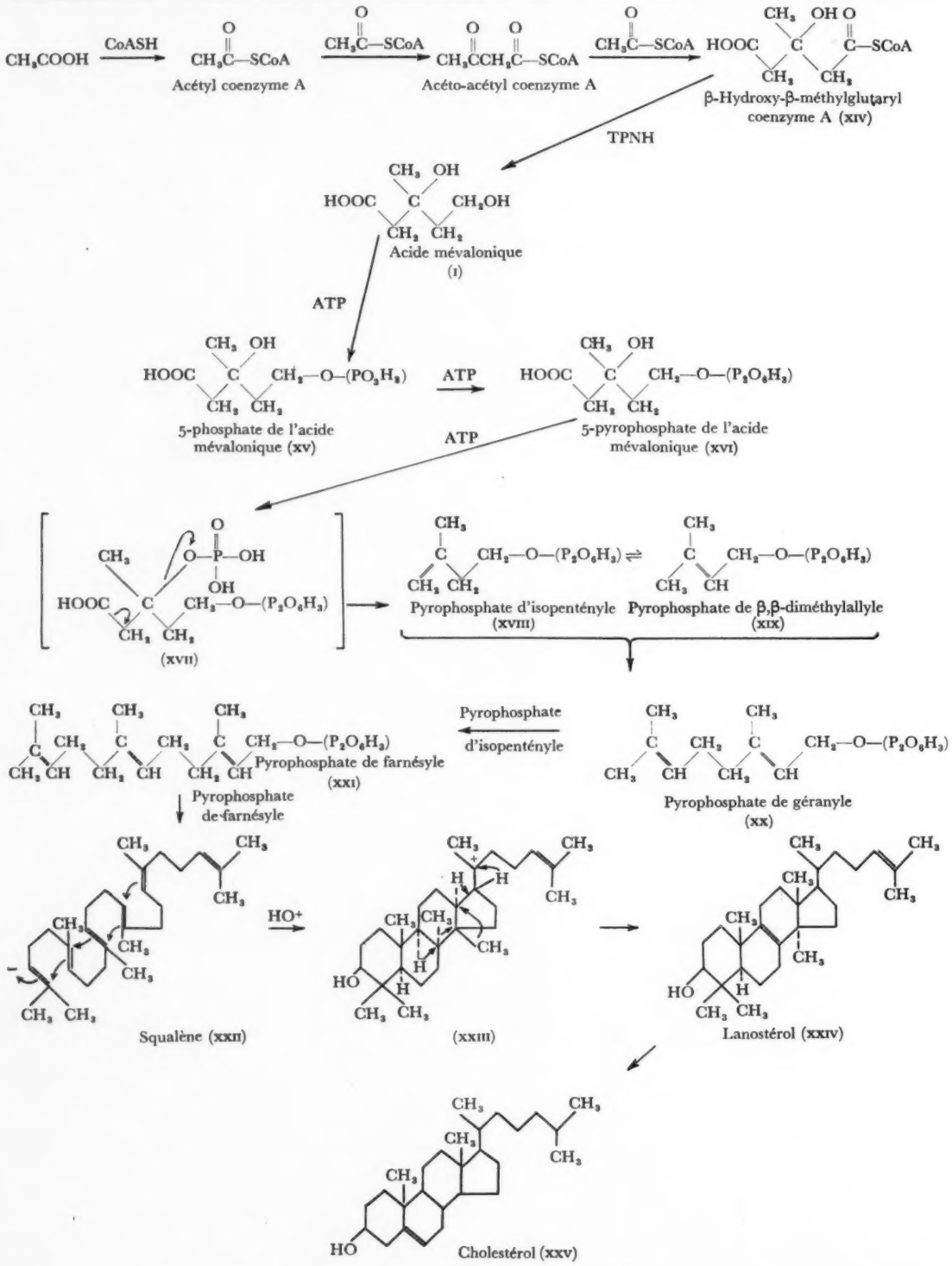


FIGURE 5 – *Biosynthèse du cholestérol.*

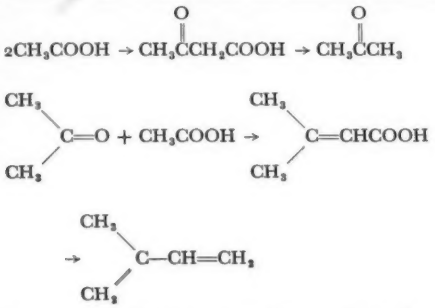


FIGURE 6 – *Mécanisme de la conversion de l'acétate en isoprène* [22].

des homogénats et extraits de foie. La distribution de la radioactivité dans le squelette carboné de chaque composé fut établie par dégradation et était compatible avec l'idée que ces unités pouvaient être utilisées dans la biosynthèse sans être d'abord dégradées en unités à deux atomes de carbone. Une étude détaillée des réactions conduisant à la conversion de l'acétate en hydroxyméthylglutarate (XIV) démontra d'une manière concluante que le β-hydroxy-β-méthylglutaryl coenzyme A se forme à partir de la condensation enzymatique de l'acétyl coenzyme A et de l'acéto-acétyl coenzyme A avec hydrolyse concomitante d'une liaison thioester [26].

Mévalonate

La connaissance de l'activité microbiologique de l'acide mévalonique et de la similitude structurale entre acide mévalonique et acide β-hydroxy-β-méthylglutarique inspira des expériences sur le rôle possible du nouveau facteur dans la biosynthèse du cholestérol. En utilisant des homogénats de foie de rat sans cellules, P. A. Tavormina, M. H. Gibbs et J. W. Huff [27] montrèrent par des expériences de radioactivité que 43,4% de l'acide DL-2-^{14}C-mévalonique étaient incorporés dans le cholestérol; par contre, seulement 0,16% et 3,8% respectivement de l'isotope de l'acide 3'-^{14}C-β-hydroxy-β-méthylglutarique et de l'acide 4-^{14}C-β,β-diméthylacrylique était incorporé dans le cholestérol dans des conditions comparables. En supposant qu'un seul des antipodes optiques du racémate soit utilisé, il fut évident que l'acide mévalonique était très efficacement incorporé. Il était également clair que l'acide mévalonique était un précurseur biologique important des stéroïdes et des produits naturels isoprénoïdes en général, et qu'il est étroitement apparenté à l'«isoprène actif» dont il est question ultérieurement. Des études ultérieures [28] de l'incorporation de l'isotope ^{14}C de l'acide 2-^{14}C-mévalonique et de l'acide 1-^{14}C-mévalonique montrèrent que le groupe carboxyle de l'acide mévalonique est éliminé pendant la biosynthèse du cholestérol; tous les atomes de carbone restants sont incorporés.

Acide mévaldique

Etant donné qu'un groupe carboxyle de l'acide β-hydroxyl-β-méthylglutarique est réduit en un groupe hydroxyméthyle pendant la synthèse enzymatique de l'acide mévalonique, le dérivé aldéhydique intermédiaire possible, l'acide mévaldique, a été étudié. Il a été synthétisé [13, 29] à partir du diméthyl acétal de l'acéto-acétaldéhyde et du bromacétate d'éthyle, d'une manière analogue à la synthèse de l'acide mévalonique (figure 1). L'acide mévaldique est un aldéhyde très réactif dont la présence en solution fut aisément établie par réduction en acide mévalonique et par d'autres moyens. Bien que l'activité microbiologique de l'acide mévaldique sur *L. acidophilus* ne soit que 0,5% de celle de l'acide mévalonique, l'efficacité avec laquelle il est incorporé dans le cholestérol par le foie de rat est indistinguible de celle de l'acide mévalonique [30].

Squalène

L'acide mévalonique est également apparenté au squalène (XXII), dont R. G. Langdon et K. Bloch [31] montrèrent qu'il est un précurseur du cholestérol chez l'animal intact; l'utilisation du squalène chez le rat est 10 à 20 fois plus efficace que celle de l'acétate. J. W. Cornforth et G. Popják [32] étudièrent la biosynthèse du squalène à partir d'acétate marqué *in vitro*, et élucidèrent la dérivation des atomes de carbone dans le squelette du squalène. La marquage du squalène cadrait avec le fait qu'il était un précurseur direct, parce que le pliage adéquat du squalène marqué pouvait produire un noyau stérol marqué exactement de la même manière que ce qui avait été établi expérimentalement. Ces expériences confirmèrent en substance une voie biosynthétique de l'acétate au stérol passant par le squalène.

Les premières connaissances sur les intermédiaires entre l'acide mévalonique et le squalène furent obtenues à partir d'études sur des extraits de levure. Le 5-phosphate de l'acide mévalonique (XV), le 5-pyrophosphate de l'acide mévalonique (XVI), le 1-pyrophosphate de 3-méthyl-3-butényle (XVIII, pyrophosphate d'isopentényle), le pyrophosphate de géranyle (XX) et le pyrophosphate de farnésyle (XXI) ont été identifiés comme étant les

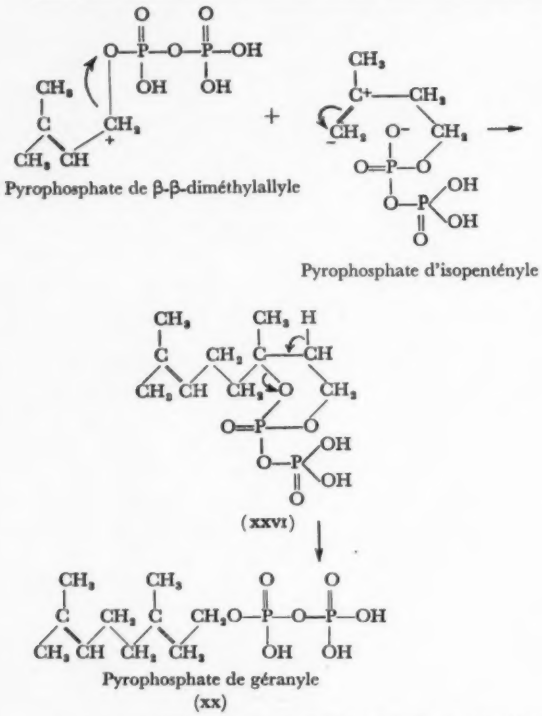


FIGURE 7 – *Mécanisme de la dimérisation du pyrophosphate d'isopentényle en pyrophosphate de géranyle* [38, 40–42].

intermédiaires successifs de la biosynthèse du squalène (figure 5).

Comme on peut montrer que l'ATP est nécessaire à la réaction enzymatique, il fut suggéré [33] que des intermédiaires phosphorylés se forment dans la conversion de l'acide mévalonique en squalène. T. T. Tchen [24] montra que l'enzyme de l'extrait de levure qui convertit l'acide mévalonique en squalène est une kinase; en présence d'ATP, elle convertit l'acide mévalonique en 5-phosphate d'acide mévalonique (XV). Celui-ci fut converti en squalène dans le système enzymatique, et on en conclut que le 5-phosphate d'acide mévalonique est le premier intermédiaire sur la voie. L'existence d'autres intermédiaires phosphorylés de l'acide mévalonique fut prédite [35] du fait que l'ATP est nécessaire pour convertir le 5-phosphate d'acide mévalonique en squalène.

Deux produits de la conversion enzymatique du 5-phosphate d'acide mévalonique par la levure en présence d'ATP ont été isolés et identifiés [36, 37]. Le premier fut identifié comme étant le 5-pyrophosphate d'acide mévalonique (XVI). La radioactivité pouvait être incorporée dans cet intermédiaire si le matériel de départ était le 5-phosphate d'acide 1-^{14}C- ou 2-^{14}C-mévalonique; il s'ensuivit que la conversion en diphospho-intermédiaire se fit avec conservation du groupe carboxyle [37]. Le second intermédiaire fut identifié comme étant le 1-pyrophosphate de 3-méthyl-3-butényle (XVIII). Etant donné que la formation de pyrophosphate d'isopentényle à partir du 5-pyrophosphate d'acide mévalonique nécessite l'ATP, la phosphorylation doit être une partie essentielle de la réaction d'élimination. Pour la conversion du 5-pyrophosphate d'acide mévalonique en pyrophosphate d'isopentényle, il a été supposé [37] que la phosphorylation se produit sur le groupe hydroxyle tertiaire, étant donné que la labilité chimique d'un ester tertiaire pourrait conduire à l'insaturation. Le mécanisme de la réaction conduisant du triphospho-intermédiaire (XVII) au pyrophosphate d'isopentényle est considéré comme une combinaison décarboxylation-déphosphorylation [37].

L'isomérisation enzymatique du pyrophosphate d'isopentényle (XVIII) en pyrophosphate de β,β-diméthylallyle (XIX) a été observée dans des extraits aqueux de levure par F. Lynen et ses collègues [38, 39]. Le pyrophosphate de géranyle (XX) et le pyrophosphate de farnésyle (XXI) ont également été identifiés par ces chercheurs comme étant des intermédiaires dans la biosynthèse du squalène à partir de l'acide mévalonique par des extraits de levure sans cellules. Un mécanisme suggéré pour la synthèse du pyrophosphate de

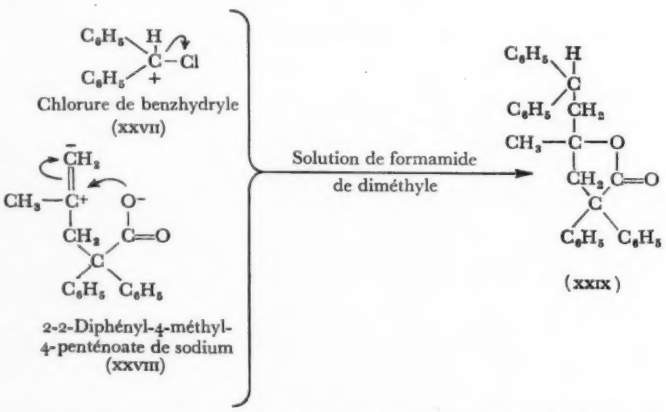


FIGURE 8 – *Réaction d'alkylation et de cyclisation analogue à la dimérisation de l'«isoprène actif»* [42].

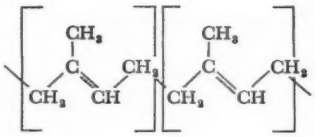
géranyle à partir du pyrophosphate d'isopentényle est représenté (figure 7) comme l'alkylation d'une double liaison isolée par un ion carbonium allylique [38, 40, 41]. Le pyrophosphate d'isopentényle s'isomérise en pyrophosphate de β,β-diméthylallyle et existe probablement sous la forme d'un mélange équilibré des deux formes. L'un des isomères peut être considéré comme l'électrophile et l'autre comme le nucléophile nécessaires à la condensation de deux molécules pour fournir un dimère. La partie non saturée du pyrophosphate d'isopentényle fournit le centre nucléophile; le pyrophosphate de β,β-diméthylallyle, sur le base de l'analogie avec le comportement des esters benzyliques et d'autres esters allyliques, est susceptible d'être attaqué sur le carbone oxygéné par le nucléophile.

W. S. Johnson et R. A. Bell [42] ont suggéré que la réaction d'alkylation se fait avec l'aide anchimérique de la portion pyrophosphatée du pyrophosphate d'isopentényle, conduisant à l'intermédiaire cyclique (XXVI). La partie phosphatée tertiaire cyclique devrait être hautement instable et se décycliser rapidement pour donner le pyrophosphate de géranyle. Une preuve de l'existence d'un tel intermédiaire provint de l'étude de la réaction d'alkylation montrée à la figure 8. L'isolement de la γ-lactone (XXIX) du produit d'alkylation prévisible non seulement étaye le concept d'un phosphate tertiaire cyclique formé au cours de la polymérisation du pyrophosphate d'isopentényle, mais est la base d'une nouvelle voie pour les réactions de cyclisation en milieu neutre, voire alcalin.

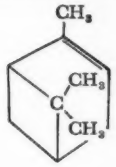
La voie biosynthétique de l'acide mévalonique au squalène dans le foie de rat est identique à celle des cellules de la levure (figure 5). Selon Popják et collaborateurs [43–46], la succession inclut des réactions comme la conversion de l'acide mévalonique en 5-phosphate d'acide mévalonique, en 5-pyrophosphate d'acide mévalonique et en pyrophosphate d'isopentényle (XVIII). La voie se poursuit par l'isomérisation de ce dernier en pyrophosphate de diméthylallyle (XIX), et la condensation de ces isomères qui donne le pyrophosphate de géranyle (XX), qui se condense avec le pyrophosphate d'isopentényle pour donner le pyrophosphate de farnésyle.

Lanostérol

Une fois établi que le squalène était un intermédiaire dans la biogenèse du cholestérol, R. B. Woodward et K. Bloch [47] suggérèrent que le lanostérol (XXIV) était un intermédiaire entre le



Caoutchouc
(XXX)



α-Pinène
(XXXI)

squalène et le cholestérol sur la voie de la biosynthèse. La biosynthèse du lanostérol à partir d'acétate marqué dans un homogénat tissulaire fut démontrée [48], et la conversion ultérieure de ce lanostérol marqué en cholestérol fut montrée.

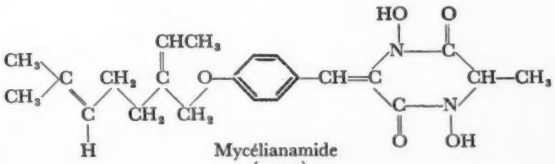
La cyclisation du squalène en lanostérol est considérée comme une seule réaction comprenant la participation simultanée d'au moins seize centres. Un mécanisme général suggéré par A. Eschenmoser et collaborateurs [49] envisage la formation d'un ion carbonium intermédiaire après la réaction d'un activateur cationique, comme HO^+, avec un substrat convenablement plié; pour la conversion du squalène en lanostérol, la réaction peut être envisagée comme une série d'attaques nucléophiles sur des centres déficients en électrons par les électrons de doubles liaisons. Avec une molécule de squalène adéquatement pliée, le déplacement simultané d'électrons déclenché par HO^+ est transmis par cinq doubles liaisons pour former la structure tétracyclique (XXIII) contenant un ion carbonium en C-20. Après la migration 1,2 de deux groupes méthyles et de deux atomes d'hydrogène, un proton est éliminé de la position 9 pour former la molécule stable de lanostérol.

Cholestérol

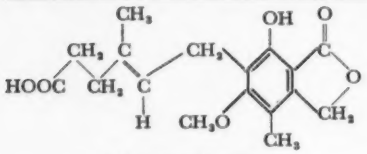
La conversion du lanostérol en cholestérol nécessite le clivage oxydatif de trois groupes méthyles. Plusieurs intermédiaires et de nouveaux précurseurs qui jouent un rôle entre le lanostérol et le cholestérol ont été identifiés [50, 51].

«ISOPRÈNE ACTIF»

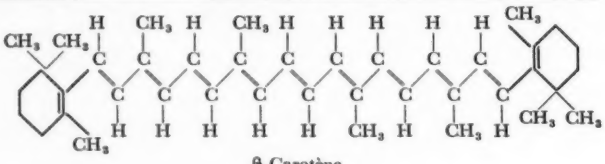
Une étape décisive de la participation de l'acide mévalonique à la biosynthèse du cholestérol est



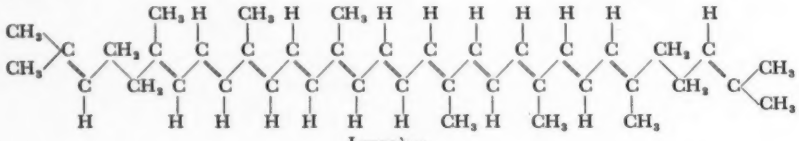
Mycélianamide
(XXXII)



Acide mycophénolique
(XXXIII)



β-Carotène
(XXXIV)



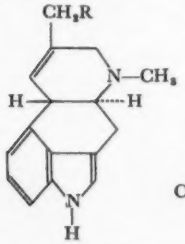
Lycopène
(XXXV)

sa conversion en pyrophosphate d'isopentényle (XVIII) qui est considéré comme l'«isoprène actif». Ce composé, avec son isomère, le pyrophosphate de β,β-diméthylallyle, forme l'unité fondamentale de la polymérisation biochimique. Quand des polymères provenant de cette unité sont soumis à d'autres transformations biochimiques, il en résulte une grande variété de composés et de polymères isoprénoïdes se rencontrant dans la nature.

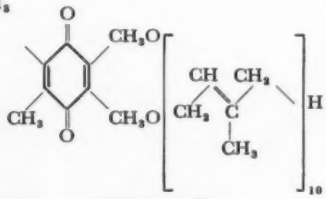
BIOSYNTHÈSE DES ISOPRÉNOÏDES

L'importance de l'acide mévalonique dans la biosynthèse des produits naturels isoprénoïdes a été établie par de nombreuses études fondées sur l'incorporation d'acide mévalonique radioactif dans diverses molécules comme le caoutchouc, les terpènes et les alcaloïdes.

R. B. Park et J. Bonner [52] observèrent l'incorporation de l'acide 2-^{14}C-mévalonique dans le caoutchouc (XXX) par un système enzymatique brut du latex d'*Hevea brasiliensis*. Des études ultérieures [53] montrèrent une conversion de 9,3% de l'acide mévalonique en polyisoprène.



Agroclavine (XXXVI, R=H) et élymoclavine (XXXVII, R=OH)



Coenzyme Q_{10}
(XXXVIII)

La conversion du pyrophosphate d'isopentényle en caoutchouc a été démontrée [54].

Dans le domaine des terpènes, R. G. Stanley [55] montra que de jeunes plants de *Pinus attenuata* incorporent l'acide 2-^{14}C-mévalonique dans la fraction monoterpène, qui se compose presque entièrement d'α-pinène (XXXI). L'incorporation d'acide 2-^{14}C-mévalonique dans la chaîne latérale terpénoïde à 10 atomes de carbone de la mycélianamide (XXXII) par *Penicillium griseofulvum* et dans la chaîne latérale à 7 atomes de carbone de l'acide mycophénolique (XXXIII) par *P. brevi-compactum* [56] a aussi été démontrée.

L'incorporation d'acide 2-^{14}C-mévalonique dans le β-carotène (XXXIV) par des cultures en croissance du champignon *Phycomyces blakesleeanus* a été démontrée par G. D. Braithwaite et T. W. Goodwin [57]. Il a été montré [58] que la moisissure *Mucor hiemalis* peut incorporer l'acide 2-^{14}C-mévalonique dans le β-carotène. La synthèse enzymatique du lycopène (XXXV) à partir de l'acide 2-^{14}C-mévalonique dans des homogénats de tomate a été observée [59].

L'importance biosynthétique de l'acide mévalonique a été démontrée dans d'autres domaines. On a ainsi démontré [60] que *Claviceps purpurea*, le champignon parasite du seigle, incorpore l'isotope ^{14}C de la 2-^{14}C-mévalolactone dans les alcaloïdes agroclavine (XXXVI) et élymoclavine (XXXVII). Celle-ci et l'acide 4-^{14}C-mévalonique peuvent être incorporés dans la chaîne latérale isoprénoïde du coenzyme Q_{10} (XXXVIII) [61, 62].

Les figures 2–4 sont reproduites de «Advances in Enzymology», Vol. XXIII, avec l'autorisation de Interscience Publishers Inc.

BIBLIOGRAPHIE

[1] NOVAK, A. F., HAUGE, S. M. et CARRICK, C. W. *Poult. Sci.*, **26**, 604, 1947.

[2] NOVAK, A. F. et HAUGE, S. M. *J. biol. Chem.*, **174**, 647, 1948.

[3] SKEGGS, H. R., WRIGHT, L. D., CRESSON, E. L., MACRAE, G. D. E., HOFFMAN, C. H., WOLF, D. E. et FOLKERS, K. *J. Bact.*, **72**, 519, 1956.

[4] OTT, W. H., DICKINSON, A. M., VAN INDERSTINE, A., BAZEMORE, A. W., PAGE, A. C. et FOLKERS, K. *J. Nutr.*, **64**, 525, 1958.
[5] TAMURA, G. *J. gen. appl. Microbiol.*, **2**, 431, 1956.
[6] TAMURA, G. et FOLKERS, K. *J. org. Chem.*, **23**, 772, 1958.
[7] WRIGHT, L. D., CRESSON, E. L., SKEGGS, H. R., MACRAE, G. D. E., HOFFMAN, C. H., WOLF, D. E. et FOLKERS, K. *J. Amer. chem. Soc.*, **78**, 5273, 1956.
[8] WOLF, D. E., HOFFMAN, C. H., ALDRICH, P. E., SKEGGS, H. R., WRIGHT, L. D. et FOLKERS, K. *Ibid.*, **78**, 4499, 1956.
[9] *Idem. Ibid.*, **79**, 1486, 1957.
[10] HOFFMAN, C. H., WAGNER, A. F., WILSON, A. N., WALTON, E., SHUNK, C. H., WOLF, D. E., HOLLY, F. W. et FOLKERS, K. *Ibid.*, **79**, 2316, 1957.
[11] CORNFORTH, J. W., CORNFORTH, R. H., POPJÁK, G. et YOUHOTSKY GORE, I. *Biochem. J.*, **69**, 146, 1948.
[12] CORNFORTH, J. W., CORNFORTH, R. H., PELTER, A., HORNING, M. G. et POPJÁK, G. *Tetrahedron*, **5**, 311, 1959.
[13] SHUNK, C. H., LINN, B. O., HUFF, J. W., GILFILLAN, J. L., SKEGGS, H. R. et FOLKERS, K. *J. Amer. chem. Soc.*, **79**, 3294, 1957.
[14] LYNEN, F. et GRASSL, M. *Z. physiol. Chem.*, **313**, 291, 1958.
[15] LYNEN, F., EGGERER, H., HENNING, U. et KESSEL, I. *Angew. Chem.*, **70**, 738, 1958.
[16] HENNING, U., MÖSLEIN, E. M. et LYNEN, F. *Arch. Biochem. Biophys.*, **83**, 259, 1959.
[17] EBERLE, M. et ARIGONI, D. *Helv. Chim. Acta*, **43**, 1508, 1960.
[18] BLOCH, K. et RITTENBERG, D. *J. biol. chem.*, **143**, 297, 1942; **145**, 625, 1942.
[19] LITTLE, H. N. et BLOCH, K. *J. biol. Chem.*, **183**, 33, 1950.
[20] CORNFORTH, J. W., HUNTER, G. D. et POPJÁK, G. *Biochem. J.*, **54**, 597, 1953; *Arch. Biochem. Biophys.*, **42**, 482, 1953.
[21] WUERSCH, J., HUANG, R. L. et BLOCH, K. *J. biol. Chem.*, **195**, 439, 1952.
[22] BONNER, J. et ARREGUIN, B. *Arch. Biochem. Biophys.*, **21**, 109, 1949.
[23] BRADY, R. O. et GURIN, S. *J. biol. Chem.*, **189**, 371, 1951.
[24] RABINOWITZ, J. L. et GURIN, S. *Ibid.*, **208**, 307, 1954.
[25] RUDNEY, H. *J. Amer. chem. Soc.*, **76**, 2595, 1954; **77**, 1698, 1955.
[26] *Idem. J. biol. Chem.*, **227**, 363, 1957.
[27] TAVORMINA, P. A., GIBBS, M. H. et HUFF, J. W. *J. Amer. chem Soc.*, **78**, 4498, 1956.
[28] TAVORMINA, P. A. et GIBBS, H. H. *Ibid.*, **78**, 6210, 1956.
[29] EGGERER, H. et LYNEN, F. *Liebigs Ann.*, **608**, 71, 1956.
[30] FOLKERS, K., SHUNK, C. H., LINN, B. O., ROBINSON, F. M., WITTREICH, P. E., HUFF, J. W., GILFILLAN, J. L. et SKEGGS, H. R. «Ciba Foundation Symposium on Biosynthesis of Terpenes and Sterols», p. 20. J. & A. Churchill Ltd., Londres. 1959.
[31] LANGDON, R. G. et BLOCH, K. *J. Amer. chem. Soc.*, **74**, 1869, 1952.
[32] CORNFORTH, J. W. et POPJÁK, G. *Biochem. J.*, **58**, 403, 1954.
[33] ADMUR, B. H., RILLING, H. et BLOCH, K. *J, Amer. chem Soc.*, **79**, 2646, 1957.
[34] TCHEN, T. T. *Ibid.*, **79**, 6344, 1957; *J. biol. Chem.*, **233**, 1100, 1958.
[35] PHILLIPS, A. H., TCHEN, T. T., et BLOCH K. *Fed. Proc.*, **17**, 289, 1958.
[36] CHAYKIN, S., LAW, J., PHILLIPS, A. H., TCHEN, T. T. et BLOCH, K. *Proc. Nat. Acad. Sci.*, **44**, 998, 1958.
[37] BLOCH, K., CHAYKIN, S., PHILLIPS, A. H. et DE WAARD, A. *J. biol. Chem.*, **234**, 2595, 1959.
[38] LYNEN, F., EGGERER, H., HENNING, U. et KESSEL, I. *Angew. Chem.*, **70**, 738, 1958.
[39] LYNEN, F., AGRANOFF, B. W., EGGERER, H., HENNING, U. et MÖSLEIN, E. M. *Angew. Chem.*, **71**, 657, 1959.
[40] RILLING, H. C. et BLOCH, K. *J. biol. Chem.*, **234**, 1424, 1959.
[41] CORNFORTH, J. W. *Tetrahedron Lett.*, No. 19, 29, 1959.
[42] JOHNSON, W. S. et BELL, R. A. *Ibid.*, No. 12, 27, 1960.
[43] DE WAARD, A. et POPJÁK, G. *Biochem. J.*, **73**, 410, 1959.
[44] LEVY, H. R. et POPJÁK, G. *Ibid.*, **72**, 35P, 1959; **75**, 417, 1960.
[45] POPJÁK, G. *Tetrahedron Lett.*, No.19, 19, 1959.
[46] GOODMAN, DE W. S. et POPJÁK, G. *Biochem. J.* **74**, 35P, 1960; *J. Lipid Res.*, **1**, 286, 1960.
[47] WOODWARD, R. B. et BLOCH, K. *J. Amer. chem. Soc.*, **75**, 2023, 1953.
[48] CLAYTON, R. B. et BLOCH, K. *J. biol. Chem.*, **218**, 305, 319, 1956.
[49] ESCHENMOSER, A., RUZICKA, L., JEGER, O. et ARIGONI, D. *Helv. Chim. Acta*, **38**, 1890, 1955.
[50] CORNFORTH, J. W. *J. Lipid Res.*, **1**, 3, 1959.
[51] CRABBÉ, P. *Rec. chem. Progr.*, **20**, 189, 1959.
[52] PARK, R. B. et BONNER, J. *J. biol. Chem.*, **233**, 340, 1958.
[53] KEKWICK, R. G. O., ARCHER, B. L., BARNARD, D., HIGGINS, G. M. C., MCSWEENEY, G. P. et MOORE, C. G. *Nature, Lond.*, **184**, 268, 1959.
[54] HENNING, U., MÖSLEIN, E. M. et LYNEN, F. *Biochem, Z.*, **333**, 534, 1961.
[55] STANLEY, R. G. *Nature, Lond.*, **182**, 738, 1958.
[56] BIRCH, A. J., ENGLISH, R. J., MASSY-WESTROPP, R. A. et SMITH, H. *J. chem. Soc.*, 369, 1958.
[57] BRAITHWAITE, G. D. et GOODWIN, T. W. *Biochem. J.*, **66**, 13P, 31P, 1957.
[58] GROB, E. C. *Chimia*, **11**, 338, 1957.
[59] SHNEOUR, E. et ZABIN, I. *J. biol. Chem.*, **234**, 770, 1959.
[60] BIRCH, A. J., MCLOUGHLIN, B. J. et SMITH, H. *Tetrahedron Lett.*, No. 7, 1, 1960.
[61] GLOOR, U. et WISS, O. *Experientia*, **14**, 410, 1958.
[62] GLOOR, U., SCHINDLER, O. et WISS, O. *Helv. Chim. Acta*, **43**, 2089, 1960.

Le «Mohole»

par SIR EDWARD BULLARD

On a depuis longtemps constaté un changement dans les propriétés des roches à une profondeur d'environ 35 km au-dessous des continents. Récemment, on a démontré que cette discontinuité, appelée le «Moho», se trouve à une profondeur de 5 km seulement sous le fond de l'océan. Le présent article expose les projets établis pour atteindre cette discontinuité en pratiquant un forage, désigné sous le nom de «Mohole»; il examine également les résultats obtenus par un forage d'essai mené à plus faible profondeur.

LA DISCONTINUITÉ DE MOHOROVIČIĆ

Le 8 octobre 1909 au matin, un tremblement de terre se produisit à environ 40 km au Sud de Zagreb, en Croatie. Des enregistrements lisibles de ce séisme furent obtenus par des stations de l'Europe entière et examinés par le Dr Andrija Mohorovičić, directeur de l'Observatoire météorologique de Zagreb [5]. Il put constater que, de même que pour d'autres tremblements de terre, étaient présentes deux sortes d'ondes, longitudinales et transversales, prévues par la théorie de la propagation des ondes élastiques dans un solide. Pour les ondes longitudinales ou ondes P, le mouvement oscillatoire des particules se produit le long d'une ligne dirigée dans la direction de déplacement de l'onde, comme l'indique la figure 1a. Pour les ondes transversales ou ondes S, le mouvement des particules forme un angle droit avec la trajectoire de l'onde (figure 1b). L'existence et la signification de ces deux types d'ondes étaient connues depuis plusieurs années, mais Mohorovičić découvrit l'existence de deux ondes P. A de courtes distances, la première de ces ondes se déplace à une vitesse qui varie selon les endroits entre 5,5 et 6,5 km/s. A environ 170 km, elle se trouve dépassée par une autre onde P se déplaçant à la vitesse de 8,1 km/s. Sur une distance d'environ 800 km de chaque côté, les deux ondes peuvent être enregistrées à la fois, comme l'indique le séismogramme de la figure 5. Au-delà, l'onde la plus lente disparaît. Les temps de déplacement des deux ondes sont représentées en fonction de la distance sur la figure 2.

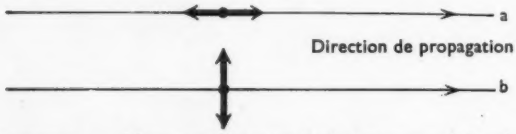


FIGURE 1 – *Mouvement d'une particule dans une onde longitudinale* (a) *et dans une onde transversale* (b).

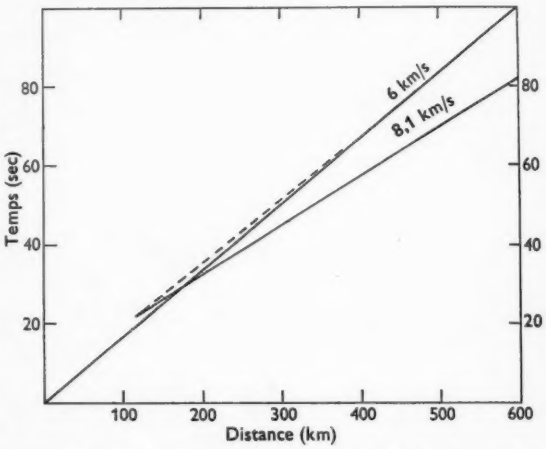


FIGURE 2 – *Temps de déplacement des ondes sismiques. Le pointillé indique le temps de déplacement de l'onde réfléchie.*

Mohorovičić a suggéré que la plus lente des deux ondes P se propage directement entre l'épicentre du tremblement de terre et le sismographe, et que l'onde la plus rapide est réfractée sur une discontinuité située à une profondeur d'environ 50 km, comme l'indique la figure 3. Cette proposition a été très généralement acceptée, et la discontinuité est connue sous le nom de discontinuité de Mohorovičić ou «Moho». Mohorovičić avait surestimé sa profondeur qui varie en réalité selon les endroits entre 30 et 45 km. Si la discontinuité est nette il devrait être possible d'observer une onde réfléchie par le Moho, onde se déplaçant

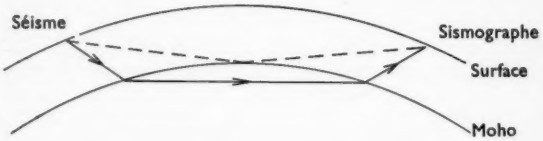


FIGURE 3 – *Coupe de la Terre montrant la réfraction d'une onde sismique sur le Moho. Le pointillé indique la trajectoire de l'onde réfléchie. La courbure de la Terre est exagérée.*

FIGURE 4 – *A. Mohorovičić.*

suivant le pointillé de la figure 3. Plusieurs chercheurs affirment avoir déterminé une telle onde, mais il est difficile d'établir avec certitude son existence étant donné le mouvement continu indiqué par l'enregistrement des ondes P. Cette question est importante, puisqu'une réflexion n'est possible que si la modification de la vitesse sismique se produit dans un intervalle de profondeur inférieur à une longueur d'onde. Tant que les ondes réfléchies n'ont pas été observées, il est difficile d'affirmer que le Moho est une véritable discontinuité, ou que la modification de la vitesse sismique s'étend sur une profondeur de quelques kilomètres.

Les observations effectuées en mer, en employant des explosions comme sources d'énergie et des hydrophones immergés comme détecteurs, ont déterminé une discontinuité semblable à une profondeur d'environ 5 km sous les grands fonds océaniques, c'est-à-dire à environ 10 km sous la surface de la mer. Il est difficile de suivre le tracé

FIGURE 6 – *Guide conique pour tige de sondage.* (*Photographie* Natural Science Foundation.)

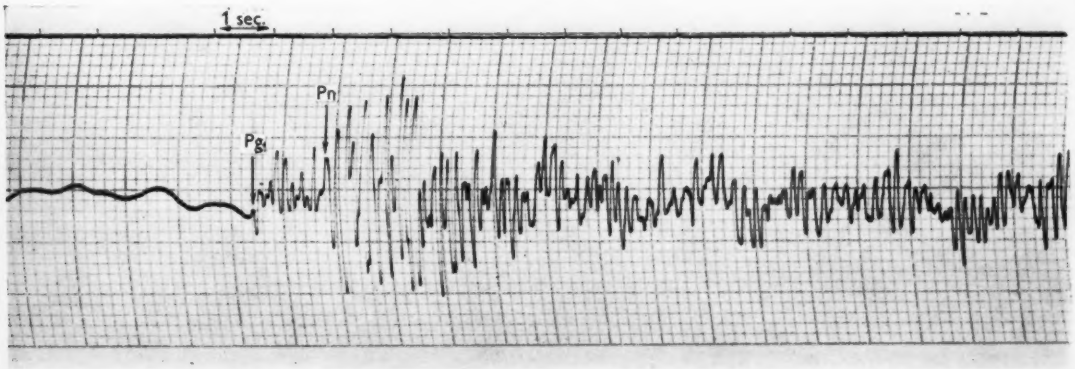


FIGURE 5 – *Sismogramme enregistré à une distance de* 113 *km d'une explosion* (*approx.* 500 *kg de Torpex*) *à Loch Striven près de Dunoon, par l'équipe sismique de l'*Atomic Energy Authority. *Pg est le point d'arrivée de l'onde directe et Pn celui de l'onde réfractée sur le Moho.*

FIGURE 7 – CUSS I.

FIGURE 8 – CUSS I *et un flotteur portant un réflecteur de radar.* (*Dû à l'amabilité de* Global Marine Exploration Company.)

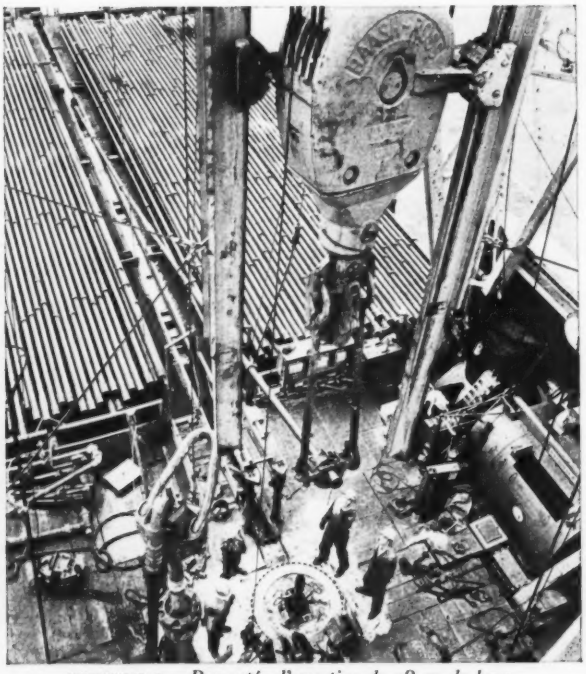


FIGURE 9 – *Remontée d'une tige de* 18 *m de long.*

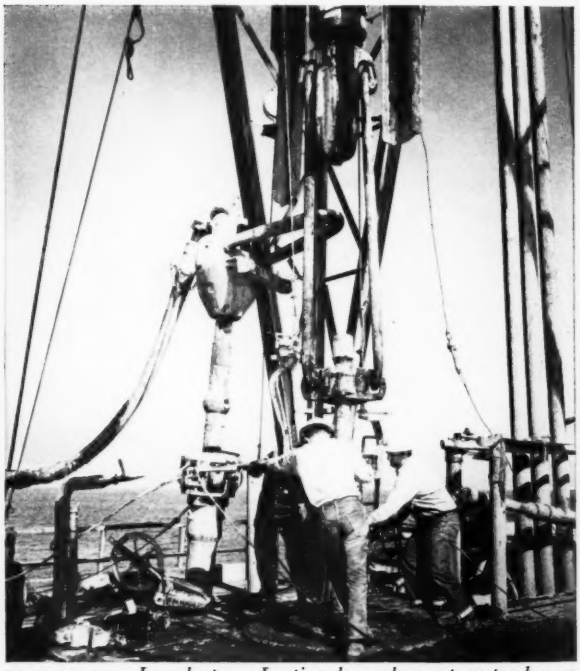


FIGURE 10 – *Le cabestan. La tige de sondage est suspendue au palan dont la partie inférieure est visible en haut de la figure. Le dispositif de pompage d'eau de mer dans la colonne de sondage se trouve à gauche.* (*Dû à l'amabilité de* Global Marine Exploration Company.)

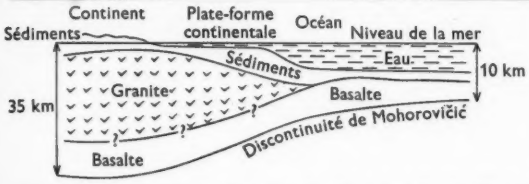


FIGURE 11 – *Coupe au large de la côte orientale des Etats-Unis.*

du Moho dans la région de transition entre le continent et l'océan. La région la mieux prospectée se trouve au large de la côte orientale des Etats-Unis [3], dont une coupe d'ensemble est représentée sur la figure 11. Il est assez probable que la partie continentale et la partie océanique du Moho se raccordent de la manière indiquée sur cette figure. La vitesse sous la discontinuité océanique est généralement inférieure de 0,2 km/s à la vitesse continentale moyenne de 8,1 km/s.

Au-dessus de la discontinuité, les roches continentales semblent différentes des roches océaniques. Sous les sédiments des continents se trouvent des roches semblables à celles qui affleurent sur les anciens boucliers, comme ceux du Canada et d'Afrique orientale. Ces roches sont spécialement des granites, des gneiss et des schistes cristallins, et représentent probablement les racines érodées d'anciennes montagnes. La vitesse sismique au-dessus du Moho s'accroît souvent avec la profondeur, probablement à cause de l'augmentation de la proportion des roches basiques. Il peut se trouver dans certains endroits des couches séparées de roches plus basiques entre les granites et le Moho. Au fond des océans se trouve une épaisseur variable de sédiments tendres dans lesquels les ondes sismiques se déplacent un peu plus vite que dans l'eau. L'épaisseur de ces matériaux est généralement comprise entre 0,1 et 1 km. Au-dessous se trouve la «couche 2», caractérisée par une vitesse sismique de 4,8 km/s et une épaisseur d'environ 2 km. Les 3 km compris entre cette dernière et le Moho sont nommés «couche 3» et permettent une vitesse sismique de 6,5 à 7 km/s. Etant donnée la très forte prépondérance du basalte parmi les roches volcaniques de l'océan, on suppose généralement que la couche 2 et la couche 3 sont formées de basalte, avec peut-être des lits intercalaires de sédiments consolidés.

La structure représentée par la figure 11 est basée principalement sur les résultats sismiques et les probabilités pétrographiques; elle est de plus confirmée par des mesures d'accélération de la pesanteur. En moyenne au niveau de la mer sur un continent elle est inférieure de quelques millionièmes à sa valeur à la surface de l'océan adjacent à la même latitude. Il s'ensuit que la masse sous une unité de surface est la même pour les continents et les océans. Ceci suggère que les matériaux situés sous le Moho ont une densité plus forte que ceux situés au-dessus, et que la plus grande quantité de ces matériaux lourds se trouvant sous l'océan compense la légèreté de l'eau de mer par rapport aux roches superficielles des continents. La différence de densité devant être d'environ 0,5 g/cm³, ceci indique une densité d'environ 3,2 g/cm³ sous le Moho. Ceci illustre le principe de l'isostasie, découvert au milieu du siècle dernier par l'archidiacre Pratt, de Calcutta, grâce à l'étude des déviations de la verticale observées par le *Survey of India*. Le principe de l'isostasie considère que les masses topographiques terrestres flottent en équilibre hydrostatique de la même manière qu'un iceberg flotte sur la mer. Ceci est exact, en règle générale, pour la plupart des zones topographiques très vastes et le principe s'applique mieux aux grands ensembles qu'aux points particuliers. La compensation nécessaire pour les masses visibles des irrégularités topographiques semble être réalisée par les variations de profondeur du Moho, et on constate l'étroite corrélation de cette profondeur avec la hauteur topographique ainsi qu'avec l'anomalie de Bouguer, comme l'indique la figure 12. (L'anomalie de Bouguer représente l'attraction ou le défaut d'attraction de différences de densité non perceptibles lorsque l'on a fait la part de la topographie visible.)

QUE SE TROUVE-T-IL SOUS LE MOHO?

La discontinuité de Mohorovičić semble être

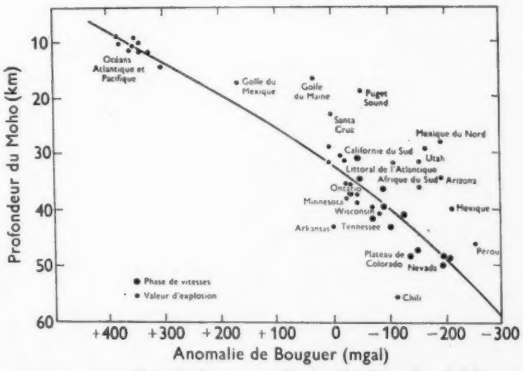


FIGURE 12 – *Corrélation entre la profondeur du Moho et l'anomalie de Bouguer. Les résultats indiqués par les petits points ont été obtenus par la méthode décrite dans le texte, ceux indiqués par les gros points, à l'aide d'une méthode utilisant les ondes de surface des tremblements de terre (d'après Woollard* [6].)

l'un des éléments majeurs de l'écorce terrestre. Elle se trouve sous tous les continents et tous les océans. Au-dessus se trouvent une variété et une complexité infinies de situations géologiques; mais, au-dessous, autant que nous puissions en juger par la régularité des vitesses sismiques, existe une beaucoup plus grande uniformité.

En dépit de son indéniable importance, nous connaissons peu de chose au sujet du Moho. Les vitesses sismiques au-dessus et au-dessous sont connues et nous avons une idée de la différence des densités de part et d'autre, mais nous ne savons absolument pas si cela représente une nette séparation entre deux milieux différents, ou si le passage de l'un à l'autre s'étend sur plusieurs kilomètres de profondeur.

La pétrologie nous fournit quelques indices quant à la nature de ces matériaux. On trouve, dans diverses parties du monde, des roches intrusives contenant des minéraux qui ne peuvent se former que sous de fortes pressions. Les mieux connues sont celles des cheminées diamantifères d'Afrique du Sud. Les relations de stabilité du diamant et du graphite sont maintenant bien étudiées et il est évident que les diamants ont dû se former au-dessous du Moho. Les roches associées doivent, par conséquent, venir également des grandes profondeurs et représentent sans aucun doute un échantillon plus ou moins contaminé des matériaux existant au-dessous du Moho. Les roches des cheminées diamantifères ont une composition minéralogique complexe, mais sont constituées en grande partie de silicates de fer et de magnésium, spécialement d'olivine, de grenat et d'enstatite. D'après les observations faites sur ces roches et d'autres provenant aussi des grandes profondeurs, on a souvent suggéré que les matériaux existant au-dessous du Moho sont formés soit de péridotite constituée principalement d'olivine riche en magnésium $(Mg,Fe)_2SiO_4$, soit d'éclogite, roche composée de grenats et de pyroxènes.

La comparaison des densités et des vitesses des ondes élastiques pour les matériaux proposés, avec les mêmes propriétés pour ceux qui se trouvent à l'heure actuelle au-dessous du Moho se complique du fait des modifications dans la structure des cristaux constatées chez beaucoup de silicates au voisinage des pressions et des températures existant au niveau du Moho continental. On a suggéré en effet que la discontinuité pouvait être due à des modifications de phase dans le basalte sans aucune modification de matière [2, 4]. Ceci est un point de vue plausible en ce qui concerne le Moho sous les continents, mais difficilement acceptable sous les océans. La pression pour le Moho océanique n'est que d'environ 1 800 kg/cm² et sa température de 120°, et une réorganisation intégrale du réseau cristallin des silicates semble tout à fait improbable dans des conditions de température et de pression aussi basses. Si, comme il semble probable, Moho continental et Moho océanique sont en continuité, le changement ne doit pas être dû, pour le premier non plus, à une modification de phase. Il faut donc supposer que le matériel qui se trouve sous le Moho est différent de celui qui se trouve au-dessus.

LE PROJET MOHOLE

Il y a de toute évidence de nombreuses possibilités, et il est impossible que la nature des matériaux puisse être déterminée à l'aide d'expériences de laboratoire ou d'observations faites à la surface de la Terre. La solution la plus satisfaisante à apporter à ce problème devrait être évidemment de pratiquer un forage pour obtenir des échantillons. Le trou le plus profond foré à l'heure actuelle sur le continent atteint une profondeur de 7,7 km; il ne semble pas possible d'améliorer suffisamment les techniques pour arriver aux 35 km nécessaires pour atteindre le Moho sous les continents. En mer, où le Moho se trouve souvent sous 5 km d'eau et 5 km de sédiments, le projet apparaît plus réalisable, bien qu'il demeure encore des difficultés considérables. L'essai actuel de perforation jusqu'au Moho a comme point de départ une proposition faite par H. Hess et W. Munk en 1957 à l'*American Miscellaneous Society* (AMSOC). En avril 1957, cette société constitua un comité de forage profond, sous la présidence de G. Lill, pour examiner les possibilités de forage jusqu'au Moho. A ce stade, il était évident qu'il y avait là matière suffisante pour effectuer des recherches. Le comité de forage profond fut alors repris par l'Académie Nationale des Sciences qui reçut une petite subvention de la *National Science Foundation* pour étudier les voies et les moyens. W. Bascom fut nommé directeur du projet. Il recruta l'équipe nécessaire et s'assura le concours d'entreprises de forages, de compagnies pétrolières et d'ingénieurs navals. Le forage fut baptisé le «Mohole», abréviation commode et euphonique pour désigner «le trou destiné à atteindre le discontinuité de Mohorovičić».

L'étude des possibilités portait sur quatre points principaux:

1. Comment un bateau peut-il être maintenu à environ 100 mètres d'un point donné en pleine mer?

2. Comment peut-on mettre en place en mer 10 km de tiges de forage et les employer à forer au-dessous de la surface de l'océan à une profondeur plus grande que celle jamais atteinte sur le continent?
3. Comment peut-on réintroduire la sonde dans le forage après l'en avoir retirée pour remplacer une couronne foreuse?
4. Où le trou devra-t-il être foré?

Au cours de l'été 1960, Bascom publia un rapport dans lequel toutes ces questions étaient examinées et ne soulevaient pas de difficultés insurmontables.

FORAGE EN MER PROFONDE

Le stade suivant consistait à acquérir une certaine expérience pratique afin de déterminer plus clairement les difficultés et pour démontrer la possibilité d'exécution du projet en forant tout d'abord sur une courte distance au fond de l'océan. Ce travail fut exécuté en avril 1961. Les forages en eau profonde sont généralement effectués à partir de derricks soutenus par des plates-formes reposant au fond de l'eau. Cette méthode ne peut être employée en haute mer, la profondeur étant généralement comprise entre 3,5 et 6 km. Dans une eau aussi profonde il est indispensable de travailler à partir d'une plate-forme flottante. Des installations de forages ont été adaptées à divers types de bateaux et de péniches et ont pu être utilisées avec succès en mer, en particulier au large des côtes de Californie. En vue des essais préliminaires concernant le Mohole, le comité de l'AMSOC a retenu la péniche *CUSS I*. Le nom de ce bateau est formé des initiales des noms de ses propriétaires, les compagnies *Continental*, *Union*, *Shell* et *Superior Oil*.

CUSS I est une péniche de transport transformée; elle a 79 m de long, 15 m de large et 4,6 m de tirant d'eau en charge. Elle transporte un derrick de 30 m de haut qui fonctionne à travers un trou pratiqué au centre du bateau (voir figures 7 et 8). Le forage d'essai fut effectué entre l'île de Guadalupe et la côte ouest du Mexique en un point situé environ à 74 km de l'île et 220 km de la côte, la profondeur de l'eau étant de 3 760 m.

En cet endroit il se trouvait donc une colonne de sondage de 3 750 m entre *CUSS I* et le fond de l'océan. Lorsque le bateau se déplace, la colonne se penche et peut se briser si l'amplitude du mouvement est trop grande. On ne connaît pas l'ampleur de mouvement nécessaire pour briser la colonne mais, d'après les calculs et d'après l'expérience en eau peu profonde, on pense qu'elle peut être d'environ 200 m. Il est donc souhaitable de pouvoir maintenir le bateau à moins de 60 m, par exemple, d'un point situé directement au-dessus du trou en cours de forage. Il est impossible, ou tout au moins très coûteux, d'ancrer avec cette précision un gros bateau en eau profonde. Il fut donc décidé de maintenir la péniche en position sans amarres en la manœuvrant à l'aide de quatre hélices placées aux quatre coins. Chacune de ces hélices peut tourner autour d'un axe vertical de manière à exercer sa poussée dans n'importe quelle direction. La combinaison du mouvement des quatre hélices permet donc au bateau de se déplacer en avant, en arrière ou sur le côté et d'effectuer des mouvements tournants. La vitesse et la position de hélices étaient commandées par une simple manette. Celle-ci était reliée aux moteurs et aux hélices de telle manière que le bateau se déplaçait dans la direction où on la poussait. Un cercle placé autour de la manette indiquait la direction de l'avant du bateau.

Ces dispositifs permettaient un contrôle très commode et très efficace de la position et de l'orientation du bateau. Les repères par rapport auxquels le bateau devait être maintenu immobile étaient représentés par un cercle de flotteurs fixés à des bouées amarrées entièrement immergées à 50 m de la surface (figure 13). Une telle bouée peut être amarrée à un filin d'acier de 6 mm de diamètre, ce qui la maintient très proche de la verticale. Le flotteur de surface (figure 8) ne subit que fort peu les impulsions du vent et des courants et ne s'écarte pas de plus de 30 m d'un point situé au-dessus de la masse ancrée. La position du bateau, à l'intérieur des cercles de bouées est déterminée par des radars et par une méthode acoustique. Chaque flotteur porte un réflecteur de radar qui transmet sa position par rapport au bateau sur un écran indicateur observé par l'homme de barre. Celui-ci voit chaque flotteur sous forme d'un point lumineux sur l'écran du radar et essaie de maintenir ces points dans leurs positions marquées. Des indications semblables sont fournies par un système acoustique utilisant des «radiophares répondants» fixés aux bouées. On dispose ainsi de deux méthodes entièrement indépendantes pour déterminer la position du bateau, chacune offrant une précision supérieure à celle requise. L'ensemble de ce système fonctionna parfaitement et le bateau put être maintenu pendant une longue période à moins de 60 m de la position exigée en dépit de vents soufflant à 50 km/h et de vagues hautes de 5 m.

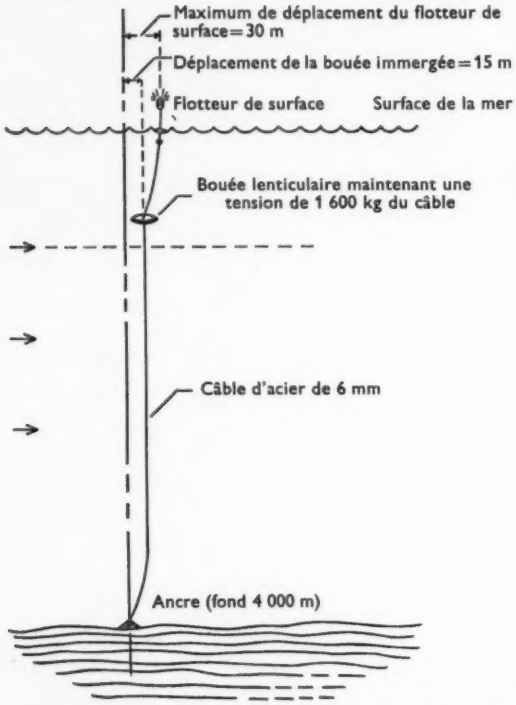


FIGURE 13 – *Une bouée repère. (Cette figure et la figure 14 sont dues à l'amabilité de Weidenfeld et Nicolson Ltd., éditeurs britanniques de l'ouvrage de W. Bascom* [1].)

Le forage d'essai fut effectué à l'aide de couronnes diamantées à trou axial. Pendant la plus grande partie du travail, celles-ci furent fixées à des tiges de forage normales; la couronne se trouvait à l'extrémité inférieure d'un train de tiges de 14 cm de diamètre, vissées par sections de 18 m, à l'aide d'un palan retenu par des «guides» comme l'indique la figure 9.

Lorsque la péniche roule et tangue, la tige de sondage s'incline. Les calculs indiquent que la tension maximale se produit près de la surface et que si l'on ne prend pas de précautions, le roulis et le tangage ne doivent pas excéder $\frac{1}{2}°$. Or ce maximum se trouve dépassé même par temps assez calme. On a surmonté la difficulté en disposant un «guide» conique autour des 16 m supérieurs de la tige de forage (figures 6 et 14). De cette manière, l'inclinaison de l'extrémité supérieure est répartie sur une plus grande longueur comme le montre la figure 6. Grâce à ce guide, on peut tolérer un roulis de $6\frac{1}{2}°$.

Les morceaux de roche ont été retirés du forage en pompant de l'eau de mer tout le long de la colonne de forage et en la laissant couler à travers la couronne, puis remonter dans le trou jusqu'au fond de la mer. Le dispositif du haut de la colonne est indiqué par la figure 10. La couronne découpe un cylindre creux de roche, laissant au centre une carotte dans un tube disposé dans son axe. Ce tube et la carotte qu'il contient peuvent être récupérés par remontées le long de la colonne de forage à l'aide d'un câble (le *sandline*). On remet le tube en place grâce au courant d'eau pompé le long des tiges de forage. On a donc pu obtenir d'importantes longueurs de carottes sans retirer ni les tiges, ni la couronne. Lorsque la couronne s'émoussait, ou qu'un accident empêchait la progression du forage, on abandonnait le trou pour en commencer un autre. Pour effectuer un forage plus profond, il faudrait être capable de réintroduire une nouvelle couronne dans le même forage.

Quelques essais ont également été effectués à l'aide d'une foreuse à turbine. L'avantage de cette méthode est qu'il n'est pas nécessaire de faire tourner les tiges et que l'on évite ainsi le frottement important développé entre la tige et le trou. Cette méthode est préférable au forage *rotary* normal en ce que la couronne de diamants peut être entraînée plus vite, avec pour conséquence un forage plus économique et plus rapide.

RÉSULTATS DES FORAGES D'ESSAI

Trois forages d'essai ont été effectués, très proches les uns des autres, près de l'île de Guadalupe. Ces forages avaient comme premier but d'améliorer les méthodes de forage en mer profonde, de circonscrire les problèmes qui pouvaient se poser et d'établir la possibilité de forages plus profonds. Ces travaux ont fourni, de plus, une

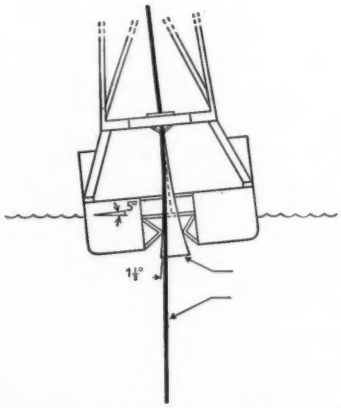


FIGURE 14 – *Effet du roulis sur la tige de sondage dans le guide conique.*

grande quantité de renseignements d'ordre scientifique. On a constaté que les sédiments présentaient une épaisseur de 180 m et reposaient sur des basaltes. Cette épaisseur concorde avec les mesures effectuées par la méthode des explosions sismiques, et la découverte de basalte n'a rien qui puisse surprendre étant donné que cette roche volcanique est de loin la plus courante dans les océans et qu'elle forme la grande masse de l'île Guadalupe située seulement à 74 km de là. Il est étonnant que l'ensemble des 180 m de sédiments semble être d'âge miocène, bien qu'à l'heure actuelle seul un examen superficiel des carottes ait pu être effectué. Il est à peu près certain que la mer recouvrait cette région bien avant le Miocène; en effet, il n'y a aucune raison de supposer que cette zone n'a pas été océanique pendant toutes les périodes révolues. Il semble très improbable que le Miocène soit la seule période au cours de laquelle les sédiments se soient déposés et nous devons conclure que d'autres sédiments sont recouverts par des basaltes du Pacifique. Il n'y a rien d'illogique, ni de surprenant à cette conclusion, mais rien n'avait été observé dans ce sens auparavant et cela éclaire le problème posé par la faible épaisseur des sédiments non consolidés décelée dans le monde entier à l'aide de la méthode sismique. Nous pouvons donc maintenant supposer que la plupart des matériaux qui seront découverts entre le Moho et le fond de l'océan seront composés de sédiments et de basaltes intercalés. La durée totale de la période représentée par le Miocène est estimée généralement à 14 millions d'années; les sédiments traversés représentent une durée moindre. Si l'on suppose qu'ils se sont déposés en 5 millions d'années, la vitesse de sédimentation est de 4 cm pour 1 000 années.

La roche découverte sous les sédiments est un basalte cristallin frais vitrifié sur un ou deux millimètres de surface. Pour autant que l'auteur puisse en juger, aucun sédiment cuit n'y adhérait; on peut donc supposer qu'il s'est épanché sur le fond de l'océan et qu'il n'a pas pénétré par intrusion, comme un sill, dans des sédiments préexistants. Les forages ont pénétré sur 15 m dans le basalte et de nombreuses carottes ont pu être recueillies.

Les mesures de températures effectuées dans l'un des forages ont indiqué un flux de chaleur deux fois supérieur à la moyenne pour les océans, cette valeur élevée concordant avec les mesures faites dans les environs à l'aide de sondages courts. Ces mesures confirment donc de façon très satisfaisante les résultats fournis par ces derniers.

PROBLÈMES POUR L'AVENIR

Après la réalisation couronnée de succès de ces forages d'essai, nous pouvons prévoir que, dans l'avenir, les travaux se développeront dans deux voies. Tout d'abord, avec les techniques actuelles ou légèrement améliorées et à l'aide de bateaux de la taille de *CUSS I*, nous pourrons certainement pratiquer des forages jusqu'à 300 m au-dessous du fond dans la plupart des régions océaniques. Ceci nous permet d'envisager la possibilité d'étudier en détail les sédiments et les laves jusqu'à cette profondeur et de suivre l'histoire des océans pendant une période considérable de la même façon que sur le continent. Ceci peut nous amener à résoudre, en peu d'années, certains des problèmes géologiques les plus importants. Il sera alors possible de régler avec certitude la question de savoir si les étendues continentales que l'on suppose avoir existé au large de certaines côtes se sont effondrées dans les océans actuels. On pourra également établir l'âge de chaque bassin océanique et, d'après les modifications observées dans les sédiments, d'étudier les changements intervenus au cours du passé dans la répartition des mers et des terres, et peut-être dans les climats et les courants marins. Le prix de revient d'un tel programme ne serait pas élevé. *CUSS I* a coûté environ 3 millions de dollars, et on pourrait probablement faire fonctionner un tel bateau pour moins d'un million par an.

La seconde voie consisterait à essayer d'atteindre le Moho. Etant donné qu'un forage aussi profond ne saurait être pratiqué avec une seule couronne, il devient nécessaire de savoir retirer la tige avec la couronne et en réintroduire une nouvelle dans le même trou. Cette manœuvre n'a jamais été tentée en eau profonde. Il existe au moins deux méthodes possibles. On peut faire descendre du bateau une paire de câbles transportant entre eux une barre horizontale. Si l'extrémité inférieure de la tige de forage est fixée au centre de la barre, elle peut glisser le long des câbles et diriger la couronne dans le forage. Cette méthode a été employée en eau peu profonde. En eau profonde, le câble et la tige risquent de s'enchevêtrer. Cela ne permet pas non plus de prévoir un trajet de retour pour le fluide pompé par le bateau dans le forage; on devra donc utiliser l'eau de mer comme dans les travaux d'essai. Lorsque l'on fore sur la terre ferme on emploie généralement comme fluide une boue thixotropique, et l'impossibilité d'agir de même dans notre cas est un grave inconvénient. La boue sert à plusieurs usages au cours des opérations de forage; elle forme un enduit sur les parois du trou et empêche

les matériaux de s'ébouler. Si la boue est de forte densité elle ne permet pas à l'eau et aux pétroles contenus dans la roche de remonter et de jaillir brusquement hors du trou, et empêche également les débris de roche de retomber sur la couronne si la circulation de boue est arrêtée.

Il semble imprudent d'adopter une méthode qui n'autorise pas une circulation de boue, et il y aurait grand avantage à installer entre le fond de la mer et le bateau un tuyau dans lequel les tiges pourraient descendre et le courant de boue remonter. Un tel tube devrait être soutenu par des flotteurs immergés de façon à pouvoir être abandonnés par le bateau en cas de mauvais temps ou pour toute autre raison, et y être par la suite rattaché de nouveau. Si ce genre de tuyau doit être transporté et installé, un bateau d'une taille nettement plus considérable que *CUSS I* sera nécessaire. Au cours des essais préliminaires, un prototype du support de base d'un semblable tuyau a été installé en eau assez peu profonde au large de San Diego, mais jusqu'ici, cette expérience n'a pas été réalisée en eau profonde. Il y a de grandes difficultés à manœuvrer, assembler et maintenir un objet aussi encombrant qu'une conduite mesurant peut-être 30 cm de diamètre et 4 000 m de long.

L'endroit où sera pratiqué le premier Mohole n'a pas encore été choisi. Cela devra être sur fond océanique «caractéristique», quoi qu'on entende par là. Le Moho doit se trouver aussi peu profond que possible, et le flux de chaleur ne doit pas être trop élevé, bien qu'il ne soit sans doute pas nécessaire de chercher un endroit à température particulièrement faible. On ne peut encore prévoir nettement si, pour une profondeur donnée du Moho au-dessous de la surface de l'océan, une grande profondeur d'eau doit être un avantage ou un inconvénient. Le temps à cet endroit devra être beau pendant un nombre important de jours en toutes saisons, et le point choisi ne pas être trop éloigné des bases de ravitaillement de matériel.

Les considérations de climat éliminent l'Atlantique et le Pacifique Nord jusqu'à environ 40° ainsi que les zones des alizés et des ouragans. Le courant chaud au large de la Californie méridionale et du Mexique présente une température plus élevée qu'il ne serait souhaitable, mais le climat favorable et les autres avantages de l'endroit laissent prévoir qu'un emplacement sera vraisemblablement choisi dans ces parages.

RÉSULTATS À ATTENDRE

Un ou plusieurs forages pénétrant en-dessous du Moho lèveraient un grand nombre d'incertitudes. Ils montreraient si le Moho marque une limite entre deux types de roches ou si, à cet endroit, se produit une modification de la structure des cristaux. Le taux de production de chaleur par radioactivité dans la partie externe du manteau pourrait être mesuré, ce qui limiterait de façon appréciable les grands écarts de répartition des températures qui, d'après ce que nous savons actuellement peuvent se produire à l'intérieur de la Terre. En particulier, si l'on découvre que les matériaux au-dessous du Moho ressemblent aux météorites pierreuses quant à leur composition chimique et à leur teneur en éléments radioactifs, cela permettrait de déterminer de manière assez détaillée l'histoire thermique de la Terre.

Ce sont là des sujets assez particuliers; la raison principale pour forer le Mohole est peut-être d'ordre plus général. Nous n'avons aucune connaissance de base solide sur l'histoire des océans. Au cours des dernières années, certains articles publiés affirment (*a*) que l'océan Atlantique s'élargit continuellement en se crevassant en son milieu, (*b*) que tous les océans s'élargissent par une expansion générale de la Terre et (*c*) que les matériaux du fond des océans sont continuellement refoulés sous les continents par des forces dues aux courants de convection de l'écorce. Ce sont des points de vue de géologie d'avant-garde, mais nombreux sont ceux qui croient encore à la permanence des océans, à leur production par l'effondrement des continents, et à leur conversion en continents.

REMERCIEMENTS

L'AMSOC et le Dr Bascom m'ont autorisé à visiter les opérations de forage d'essai au large de l'île Guadalupe en avril dernier. Le chaos organisé que j'y ai observé m'a beaucoup impressionné, non seulement en tant que réalisation scientifique, mais en tant que coopération entre des catégories très différentes d'individus, marins, sondeurs, océanographes et ingénieurs entre autres. Sans cette visite je n'aurais pu écrire cet article. Je dois également au récent ouvrage du Dr Bascom [1] de nombreux renseignements.

BIBLIOGRAPHIE

[1] Bascom, W. «A hole in the bottom of the sea». Doubleday, New-York. 1961.

[2] Fermor, L. L. *Spec. Publ. Indian Ass. Cult. Sci.*, No. 6, 1938.

[3] Heezen, B. C., Tharp, M., et Ewing, M. *Spec. Pap. geol. Soc. Amer.*, N° 65, 1959.

[4] Lovering, J. F. *Trans. Amer. geophys. Un.*, **39**, 947, 1958.

[5] Mohorovičić, A. *J. met. Obs. Zagreb*, **9**, Partie 4, Sect. 1, 3, 1909.

[6] Woollard, G. P. *J. geophys. Res.*, **64**, 1521, 1959.

Les quanta de lumière et la vision

par M. H. PIRENNE

La sensibilité de l'œil est si grande qu'un très petit nombre de quanta lumineux peuvent lui faire atteindre son seuil d'excitation. Pour des luminances proches du seuil de vision, les propriétés quantiques ont des conséquences importantes, et elles sont aussi importantes dans la théorie générale des processus visuels. L'auteur étudie les phénomènes qui en résultent et leur interprétation théorique. Il attire l'attention sur l'importance des réponses nerveuses lorsque l'action de la lumière sur la rétine est brusquement interrompue.

Considérée comme détecteur de rayonnement électromagnétique, la rétine humaine présente un domaine de sensibilité très limité en longueurs d'onde: le domaine visible du spectre. A l'intérieur de ce domaine, la sensibilité[1] rétinienne dépend étroitement de la longueur d'onde (figure 2). La sensibilité est la plus élevée lorsqu'une longueur d'onde de la région 500 mμ est utilisée dans des conditions telles que la vision se fait par l'intermédiaire des bâtonnets, c'est-à-dire par une zone périphérique de la rétine. Les nombres de quanta qui agissent directement sur les bâtonnets récepteurs de la rétine et les stimulent sont alors si petits que les propriétés quantiques du rayonnement doivent être explicitées dans la théorie des processus visuels, en particulier lorsque l'on considère les fluctuations purement physiques qui interviennent dans le stimulus lumineux lui-même.

Toutes les preuves existantes indiquent que la diminution de sensibilité des bâtonnets pour des longueurs d'onde inférieures ou supérieures à 500 mμ environ est due au fait que la substance photosensible qu'ils contiennent (rhodopsine ou pourpre visuel) absorbe proportionnellement moins de lumière à ces longueurs d'onde. De même, les nombres de quanta effectivement captés par les bâtonnets et susceptibles d'agir sur eux restent très petits dans le cas de lumières monochromatiques de longueurs d'onde différentes de 500 mμ, ou de répartition spectrale étendue, par exemple en lumière blanche. Ainsi, lorsqu'on cherche la plus petite quantité de lumière juste suffisante pour voir avec les bâtonnets, on constate qu'il faut environ un million de fois plus de quanta incidents sur la rétine à 720 mμ qu'à 500 mμ; cependant, il est à peu près certain que le nombre de quanta absorbés par les bâtonnets est essentiellement le même dans les deux cas.

Les expériences montrent que la quantité d'énergie nécessaire pour déclancher une réponse visuelle est minimale dans le cas d'un éclair bref à 507 mμ environ, observé en vision périphérique, l'œil ayant été préalablement complètement adapté à l'obscurité. Le contenu énergétique d'un tel éclair est d'environ 100 quanta; cette mesure, effectuée sur la cornée, représente la quantité moyenne d'énergie entrant dans l'œil. Remarquons que le quantum est utilisé ici simplement comme une unité pratique d'énergie, puisque les propriétés quantiques de la lumière ne sont effectives que lorsque la lumière est absorbée, étant donné qu'il est impossible de localiser des quanta dans un flux d'énergie rayonnante. Les valeurs moyennes d'énergie seront parfois exprimées par des nombres fractionnaires de quanta, bien que, cela va de soi, le nombre de quanta absorbés soit toujours un nombre entier. Comme on le montrera plus tard, le nombre moyen de quanta absorbés par les bâtonnets dans ces expériences est de 10 environ; il se peut qu'il soit inférieur à 10, mais il dépasse toujours un. Ces quanta sont répartis dans un certain nombre de bâtonnets (quelques centaines de bâtonnets pour une région d'expérience située à l'intérieur d'un angle de 10′ environ (figure 3)). Il est impossible, ne serait-ce qu'à cause de la diffraction due à la pupille, d'exciter un seul bâtonnet. L'infime petitesse des quantités d'énergie utilisées dans ces expériences est illustrée par le fait que l'énergie mécanique nécessaire pour soulever un pois à une hauteur de 3 cm serait suffisante, si on la convertissait en lumière, pour montrer un faible signal lumineux à chacun des hommes qui ont vécu jusqu'ici.

[1] La sensibilité est définie ici comme l'inverse de la quantité définissant le seuil, celui-ci étant donné par $W_\lambda \tau_\lambda / h\nu$, où W_λ est la valeur du seuil d'énergie sur la cornée, τ_λ le facteur de transmission du corps de l'œil, $h\nu$ le quantum d'énergie. Il s'agit de la sensibilité au niveau rétinien en termes quantiques. La sensibilité ($1/W_\lambda$) mesurée sur la cornée de l'œil en termes énergétiques est bien entendu différente; pour les bâtonnets, elle est maximale à 507 mμ [31, 32] au lieu de 500 mμ environ.

La capacité de réponse de l'œil à l'absorption de très petits nombres de quanta par les récepteurs rétiniens est d'importance pratique dans la vie courante. Par exemple, si nous nous réveillons au milieu d'une nuit très sombre et que nous regardons la fenêtre de notre chambre, nous pouvons distinguer les barreaux de la fenêtre sur la tache plus claire du ciel. Si, après une ou deux minutes, nous fermons à nouveau les yeux, pendant toute l'opération nos rétines n'auront pas reçu assez de lumière pour permettre à chacune des cellules réceptrices mises en jeu d'absorber même un seul quantum de lumière. D'une manière plus générale, nous pouvons voir assez bien par une nuit obscure pour trouver notre chemin, même si, au niveau d'éclairement ambiant, la majorité de nos cellules réceptrices rétiniennes restent, à tout instant donné, entièrement non excitées, la substance sensible qu'elles contiennent n'absorbant absolument aucune lumière. Ce n'est que lorsque le niveau d'éclairement correspond à celui de la pleine lune que l'intensité est suffisante pour que chaque bâtonnet absorbe plusieurs quanta par seconde.

LES CÔNES ET BÂTONNETS DANS LA VISION HUMAINE

La rétine contient deux types de cellules réceptrices, les cônes et les bâtonnets (figures 3 et 4). Le système des bâtonnets est actif surtout la nuit et dans toutes les circonstances où l'œil répond à de faibles éclairements auxquels il s'est complètement adapté. Après stimulation par la pleine lumière du jour, il faut au moins une demi-heure à l'œil pour s'adapter totalement à l'obscurité.

Quelques-unes des propriétés des bâtonnets ont déjà été décrites. Le pigment photosensible, la rhodopsine, est contenu dans les segments terminaux des bâtonnets (*b* dans la figure 4). Il est de couleur rose, parce qu'il absorbe le plus fortement dans la région bleu-vert et transmet à peu près complètement l'extrémité rouge du spectre; la courbe de sensibilité des bâtonnets (figure 2, courbe 1) est parallèle à celle de l'absorption de la lumière par la rhodopsine, dans la région où celle-ci peut être mesurée. Dans le cas de rétines adaptées à l'obscurité, chez l'homme ou chez des animaux comme la grenouille, à l'état frais, on peut facilement examiner cette coloration rose au microscope sous un éclairement faible. Sous un éclairement fort la couleur s'estompe rapidement, parce que la rhodopsine blanchit sous l'action de la lumière. On peut préparer des extraits aqueux de rhodopsine à partir de rétines et ses propriétés *in vitro* ont fait l'objet de nombreuses études.

Ne peuvent agir sur la substance photosensible que les quanta absorbés; inutile de dire que des fractions de quanta ne peuvent être absorbées. Ce dernier fait fondamental simplifie souvent la discussion sur l'action des excitants lumineux sur la rétine. Par exemple, lorsque la quantité d'énergie absorbée correspond à un nombre de quanta petit comparé au nombre de récepteurs intéressés, il s'ensuit que certains récepteurs auront absorbé un ou plusieurs quanta, tandis que les autres n'auront pas absorbé de lumière du tout. Il n'est pas tout à fait sûr que tous les quanta ainsi absorbés soient des «quanta actifs» en ce sens qu'ils conduisent à l'excitation nerveuse des cellules réceptrices; mais en tous cas, le nombre de quanta actifs ne peut être qu'égal ou inférieur au nombre de quanta absorbés. En général, on admet que ce qui importe dans l'excitation des bâtonnets est le nombre de quanta lumineux agissant sur eux et non l'énergie des quanta individuels. Nous discuterons plus tard des expériences faites avec de la lumière d'environ 507 mμ, mais, en fonction du nombre de quanta agissant sur les bâtonnets, les résultats doivent être également valables pour d'autres lumières, par exemple pour la lumière du ciel nocturne.

Le système des cônes de l'œil est actif en lumière diurne normale et nous donne alors une vision colorée et nette. Du fait du réflexe de fixation, nous utilisons la vision directe ou fovéale pour examiner toute partie d'un objet qui attire notre attention. Le centre même de la *fovea centralis* (fosse rétinienne) ne contient que des cônes (figure 1). Il devient aveugle aux éclairements faibles pour lesquels le système des bâtonnets, qui n'existe que dans la zone périphérique de la rétine, est encore à même de fonctionner. C'est pourquoi il nous faut, en dépit du réflexe de fixation, regarder «du coin de l'œil» pour mieux voir la nuit. L'astronome Arago a dit, de manière humoristique, que pour voir les objets les plus faiblement éclairés, il faut ne pas les regarder. Cette sensibilité plus faible du système des cônes fovéaux est due en partie à une capacité de sommation moindre des excitants lumineux dans l'espace et dans le temps; ceci donne, à son tour, une plus grande acuité visuelle à la fovéa qu'aux régions périphériques. Cependant, même pour des stimuli faibles et brefs, le plus petit nombre de quanta perceptibles, mesuré sur la pupille, se trouve être sensiblement plus grand pour la fovéa que pour la périphérie. Dans son ensemble, le système des cônes fovéaux présente son maximum de sensibilité vers 555 mμ. Il contient plusieurs

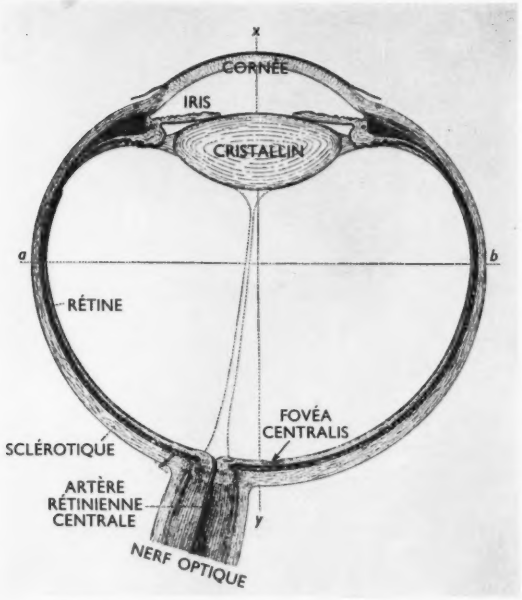


FIGURE 1 – *Section d'un œil humain adulte. La* fovea centralis *est une dépression de la rétine, de diamètre une fraction de millimètre, située au voisinage de l'axe* xy *de l'œil. Son centre ne contient que des cônes. Le reste de la rétine contient des cônes et des bâtonnets.* (× 3) (*D'après E. A. Schäfer, «Quain's Elements of Anatomy», Vol.* III, *tome* III, *Londres*, 1894.)

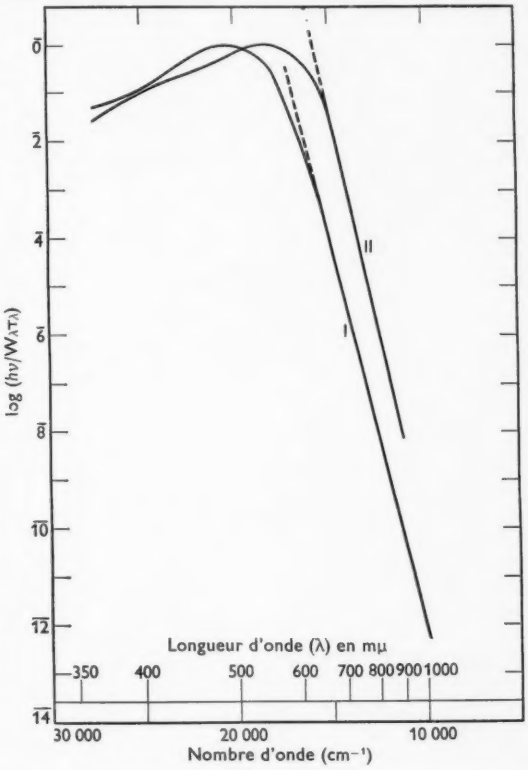


FIGURE 2 – *Sensibilité spectrale relative des cônes et bâtonnets humains. Courbe* I: *vision parafovéale par bâtonnets. Courbe* II: *vision fovéale par cônes. Dans la figure, les valeurs maximales des courbes de sensibilité ont été arbitrairement ramenées à l'égalité; leur séparation effective suivant l'échelle verticale varie avec les conditions expérimentales.* (*D'après W. S. Stiles* [1].)

«mécanismes» de cônes de sensibilités spectrales différentes [3]. Les cônes individuels eux-mêmes doivent avoir des propriétés différentes et contiennent certainement plusieurs pigments sensibles [4]. Les pigments des cônes sont beaucoup moins connus que la rhodopsine, surtout en ce qui concerne la quantité de lumière absorbée *in situ* [5]. Par conséquent, l'étude des effets quantiques est plus difficile et moins avancée pour les cônes que pour les bâtonnets et, dans cet article, nous concentrerons notre attention sur ces derniers.

Tandis que le centre de la fovéa n'est occupé que par des cônes, toutes les autres régions rétiniennes contiennent à la fois des cônes et des bâtonnets; cependant, dans la périphérie, le nombre des bâtonnets est bien supérieur. Sauf dans le cas des grandes longueurs d'onde, à l'extrémité rouge du spectre, la vision périphérique adaptée à l'obscurité aux intensités les plus faibles a lieu uniquement par l'intermédiaire du système de bâtonnets. On l'a démontré dans des expériences mettant en œuvre la sensibilité directionnelle de la rétine (effet Stiles-Crawford [5–7]), qui est une propriété des cônes presque exclusivement, non des bâtonnets. En gros, les

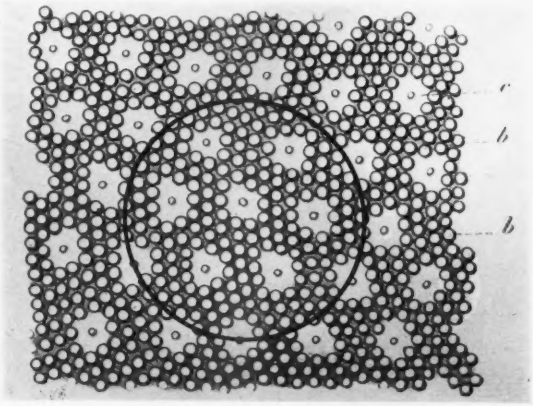


FIGURE 3 – *Mosaïque des bâtonnets* (b) *et des cônes* (c) *dans la région périphérique de la rétine humaine* [2]. (× 750) (*D'après M. Schultze*, 1866). *Le grand cercle représente l'image géométrique, de diamètre* 48,5 μ, *d'une plage test de dimension angulaire* 10′ *d'arc.*

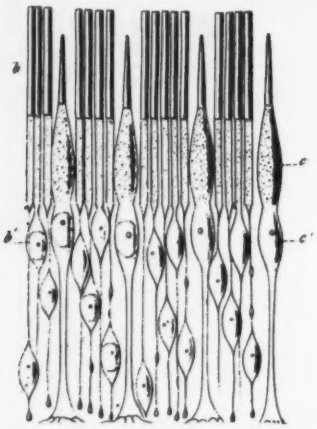


FIGURE 4 – *Section de la couche des bâtonnets* (b) *et des cônes* (c) *dans la périphérie de la rétine humaine. La lumière venant de la pupille traverse la rétine et atteint finalement la rhodopsine contenue dans les segments terminaux des bâtonnets* b, *dessinés en sombre dans la figure.* (× 500) (*D'après M. Schultze* [2].)

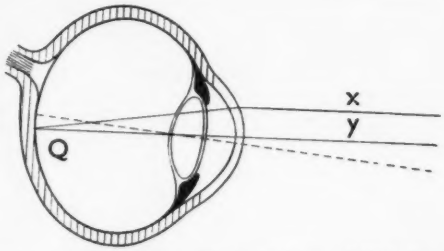


FIGURE 5 – *Diagramme illustrant la sensibilité directionnelle de la rétine (effet Stiles-Crawford).* (*D'après W. S. Stiles* [7].)

cônes sont en fait beaucoup moins stimulés par les rayons qui tombent obliquement sur la rétine au lieu de tomber normalement, tandis que l'excitation des bâtonnets, en règle générale, est presque indépendante de la direction de la lumière incidente à l'intérieur de l'éventail des directions balayées par la pupille naturelle. La lumière rouge sombre excite souvent les cônes périphériques adaptés à l'obscurité ainsi que les bâtonnets, mais l'excitation peut être limitée aux bâtonnets lorsqu'on emploie un pinceau étroit de lumière rouge d'intensité convenable, entrant près du bord de la pupille. Supposons que dans la figure 5 les rayons rouges X et Y, d'égale intensité, tombent sur la rétine adaptée à l'obscurité, au même endroit, Q, qui contient à la fois des bâtonnets et des cônes. X et Y excitent les bâtonnets presque de la même manière. A des intensités assez élevées, le rayon Y tombant normalement sur la rétine stimule les cônes plus fortement que X qui tombe obliquement. On peut maintenant réduire l'intensité de telle sorte que, tandis que Y excite toujours les cônes et les bâtonnets, X excite seulement les bâtonnets. Si l'on déplace le point d'entrée d'un pinceau de lumière rouge le long d'un diamètre de la pupille dilatée, on voit d'abord la source rouge presque incolore, blanchâtre ou grisâtre puis rouge et finalement à nouveau incolore. Ce qui veut dire que pour une entrée périphérique une lumière de longueur d'onde élevée donne la même sensation, presque incolore, que celle donnée par une lumière correspondant à une autre partie du spectre pour une entrée périphérique ou centrale. On trouve également que la sensibilité spectrale relative est la même dans le cas d'une entrée centrale ou périphérique quelle que soit la longueur d'onde, sauf pour le rouge [8]. La couleur rouge souvent observée en vision périphérique adaptée à l'obscurité dans le cas d'excitations par les grandes longueurs d'onde d'intensité suffisante doit donc être imputée à un effet des cônes. Lorsque le système de bâtonnets est excité isolément, il n'est pas capable de distinguer entre des longueurs d'ondes différentes. Cette observation soutient, entre autres, l'hypothèse qu'à l'intérieur du domaine visuel tous les quanta actifs provoquent une excitation nerveuse du même genre dans les bâtonnets, indépendamment de l'énergie de chaque quantum. Tout ceci a rapport avec l'observation bien connue qu'aux nuits noires on ne peut distinguer la couleur des objets. Les objets rouges ne paraissent alors ni rouges, ni gris, mais noirs parce qu'ils ne réfléchissent pas assez de lumière pour stimuler soit les cônes soit les bâtonnets.

SENSIBILITÉ EN VISION DES BÂTONNETS

Le seuil absolu de l'œil pour un champ objet test étendu, émettant une bande spectrale dans la région de 507 mμ pendant des durées assez longues, illustre de la façon la plus simple la sensibilité du système de bâtonnets. Dans une série d'expériences, les conditions étaient les suivantes: angle de champ, 47°; durées d'exposition, 15 secondes; vision binoculaire avec libre mouvement des yeux [9].

Le seuil absolu est, en gros, représenté par l'intensité la plus faible pour laquelle le champ objet reste visible. Cette valeur doit être définie statistiquement, puisque, pour une intensité donnée, le champ peut être, ou non, visible. Il existe un domaine d'intensité où la perception est incertaine et imprévisible. Un tel domaine

d'incertitude se rencontre dans toutes les expériences sur le seuil de visibilité. Il faut l'expliquer par une combinaison de variations biologiques à l'intérieur de l'organisme et des fluctuations purement physiques du stimulus lumineux lui-même. Dans le cas d'un bref éclair présenté à la périphérie, il a été possible de montrer que les fluctuations quantiques, qui sont alors relativement très grandes, puisque le nombre de quanta agissant sur la rétine est petit, sont une cause majeure d'incertitude dans la vision [10–14].

Par définition, le seuil absolu correspond à l'intensité pour laquelle un champ étendu éclairé peut être détecté par l'œil dans 50% des essais, chaque essai durant 15 secondes. La valeur du seuil ainsi défini varie d'un sujet à l'autre et même d'un jour à l'autre pour un même sujet. Des variations du même ordre sont observées dans le cas du seuil défini statistiquement pour d'autres conditions expérimentales, par exemple pour un bref éclair de petites dimensions angulaires.

La valeur moyenne du seuil ainsi obtenue pour des sujets jeunes normaux conduit à la conclusion que, à la limite de visibilité de notre champ étendu, chaque bâtonnet absorbe, en moyenne, un seul quantum toutes les cent minutes. L'énergie du quantum pour $\lambda = 507$ mμ est $3{,}92 \times 10^{-12}$ erg.

Cette conclusion repose d'abord sur une mesure directe, celle de la valeur moyenne de l'énergie absolue du flux lumineux entrant dans l'œil à travers la pupille pour la valeur du seuil. On l'obtient en déterminant le flux énergétique venant de la source pour une intensité plus élevée et en abaissant le niveau au moyen de filtres de transmissions connues. La conclusion ci-dessus est basée sur un autre point fondamental, l'évaluation de la fraction k de lumière $\lambda = 507$ mμ, qui étant entrée dans l'œil, est en fin de compte absorbée par la rhodopsine dans les cellules des bâtonnets humains vivants. La valeur de k est obtenue (*a*) par détermination des pertes de lumière qui se produisent dans les milieux optiques de l'œil humain, de la cornée à la rétine, et (*b*) la détermination de la fraction de lumière absorbée par la rhodopsine dans les bâtonnets. Ces deux déterminations présentent quelques incertitudes et, bien entendu, varient d'un œil à l'autre. D'après Ludvigh et MacCarthy [15], la fraction de lumière 507 mμ qui atteint la rétine après traversée du milieu oculaire est 0,50. Rushton [16] a évalué à 0,20 la fraction de cette lumière qui est alors absorbée par la rhodopsine dans les bâtonnets vivants, ceci au moyen d'une délicate méthode de densitométrie par réflexion. Il s'agit

FIGURE 6 – *Anneau de Landolt, objet test pour l'étude de l'acuité visuelle. La largeur de l'ouverture de l'anneau et l'épaisseur de l'anneau noir sont égales à un cinquième du diamètre total de l'anneau.*

essentiellement d'une méthode dans laquelle l'intensité de la lumière réfléchie par l'arrière de la rétine est mesurée avant et après blanchiment complet de la rhodopsine *in situ* en lumière intense. La différence correspond à l'absorption de la lumière lors du double passage à travers la couche de rhodopsine contenue dans les bâtonnets adaptés à l'obscurité. Suivant les hypothèses précédentes, $k = 0{,}5 \times 0{,}2 = 0{,}10$.

La valeur exacte de la fraction de lumière absorbée par les bâtonnets n'est pas de très grande importance dans le présent contexte. Même dans l'hypothèse extrême et impossible de 100% de

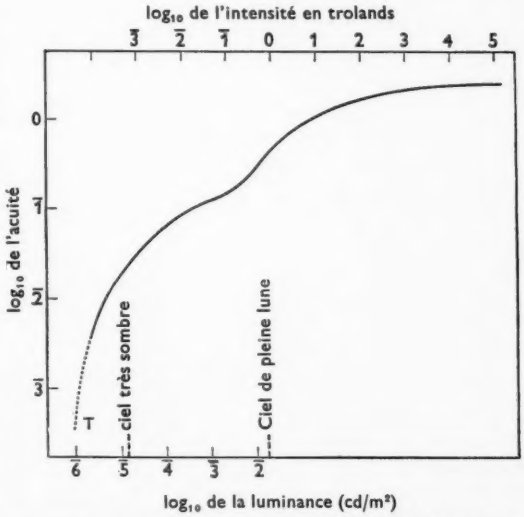


FIGURE 7 – *Variation d'ensemble de l'acuité visuelle avec l'intensité pour un anneau noir de Landolt. L'acuité visuelle est définie par l'inverse de l'angle, en minutes d'arc, sous lequel on voit, l'ouverture de l'anneau. Un troland est l'éclairement rétinien produit par une surface de luminance 1 candela par mètre carré, lorsque l'aire de la pupille est 1 mm². Les luminances du champ extérieur sont données sur l'axe inférieur des abscisses. Le point T indique la valeur moyenne du seuil absolu de luminance pour une plage de 47° de diamètre, dans le cas de sujets jeunes.* [*Voir* 9].

lumière absorbée par la substance visuelle contenue dans les bâtonnets rétiniens, pour le champ étendu considéré, le seuil absolu conserverait la valeur moyenne remarquablement basse d'un quantum absorbé par bâtonnet toutes les dix minutes.

La valeur $k = 0{,}10$, qui devrait être considérée plutôt comme une estimation raisonnable que comme une mesure précise, sera prise comme base dans les discussions ultérieures. Elle conduit à une moyenne de $1{,}73 \times 10^{-4}$ quantum absorbé par seconde par bâtonnet au niveau absolu dans le cas de notre champ étendu pour des durées d'exposition assez longues. Un quantum en moyenne est donc absorbé toutes les secondes par 5 800 bâtonnets. L'image rétinienne d'un champ circulaire d'étendue angulaire de 47° représente une aire de 1,5 cm². Lorsque cette image tombe sur la périphérie rétinienne, elle couvre environ 750 000 cônes et 20 millions de bâtonnets. Ce grand nombre de bâtonnets absorbe seulement une moyenne de 3 500 quanta par seconde dans les conditions qui viennent d'être décrites.

VISION DES BÂTONNETS AUX LUMINANCES PLUS ÉLEVÉES

Dans les essais où il est perceptible au seuil absolu, l'aspect du champ lumineux est extrêmement vague et diffus. Mais si l'intensité lumineuse est amenée à trois fois sa valeur au seuil, le sujet voit nettement le champ et peut distinguer en face les doigts de sa main. A dix fois la valeur au seuil, si un anneau de Landolt noir (figure 6), dont l'ouverture sous-tend un angle visuel de 1°, est placé au milieu du champ, un sujet entraîné peut détecter la position de l'ouverture dans 50% des essais. Ainsi, la vision des formes acquiert déjà ici un degré d'efficience mesurable, quoique l'absorption moyenne de la lumière n'atteigne que 0,002 quantum par bâtonnet par seconde — c'est-à-dire un quantum toutes les 10 minutes environ. Ce niveau d'intensité est un peu inférieur à celui qui correspond, en termes de quanta absorbés par les bâtonnets, au ciel des nuits les plus noires [9] (figure 7).

En termes de quanta actifs, les valeurs des éclairements dont il a été question plus haut sont si basses que la nature quantique de la lumière conserve son importance aux niveaux d'intensité élevés, où la vision devient efficiente. La luminance du ciel à la pleine lune est environ 20 000 fois celle qui correspond au seuil absolu de l'œil. Ici la position de l'ouverture peut être détectée sur un anneau de Landolt de plus petites dimensions angulaires, à savoir, un anneau où la largeur de l'ouverture est de 3′ d'arc. Ceci représente un assez bon pouvoir de résolution, puisque le maximum de résolution de l'œil en lumière intense, pour le même type de test, n'est que sept fois plus grand, correspondant à une ouverture de 0,4′ environ. (Ce maximum de résolution est obtenu par les cônes fovéaux centraux et correspond approximativement à la séparation angulaire de ces cônes.) Dans le cas du ciel éclairé par la lune, chaque bâtonnet absorbe en moyenne 4 quanta par seconde. Dans la réaction photochimique primaire, chacun de ces quanta agit sur une seule molécule, ou plutôt sur un seul groupe chromophorique, de rhodopsine. Un bâtonnet humain contient environ 10^8 groupes chromophoriques. Le rendement quantique du blanchiment de la rhodopsine n'est pas supérieur à l'unité, c'est-à-dire que le rapport du nombre de molécules de rhodopsine blanchies par absorption d'un quantum au nombre de molécules qui ont absorbé un quantum peut être égal à un, ou ½, mais non supérieur à l'unité. Il ne s'agit pas d'une réaction en chaîne dans laquelle un quantum absorbé pourrait conduire au blanchiment de plusieurs molécules; cette conclusion est tirée des mesures de rendements quantiques effectuées sur des solutions de rhodopsine et sur la rhodopsine *in situ*, dans des rétines d'animaux. Ainsi, comme l'a fait remarquer Baumgardt [17], le taux de blanchiment de la rhodopsine dans les bâtonnets reste faible pour tous les niveaux d'intensité correspondant à la vision de nuit. Au clair de lune, il n'atteint que 4×10^{-8} par seconde, ou 0,015% par heure. Il est évident que l'action de la lumière sur les bâtonnets n'est pas une réaction photochimique ordinaire intéressant un grand nombre de molécules; le nombre absolu de molécules de rhodopsine sur lesquelles agit la lumière dans chaque bâtonnet est petit en vision nocturne. Un mécanisme d'amplification dont la nature est encore inconnue doit travailler dans la cellule réceptrice du bâtonnet. Au niveau du clair de lune les cônes parafovéaux entrent en jeu à côté des bâtonnets; aux luminances plus élevées, c'est le centre de la fovéa, qui ne contient que des cônes, qui donne la meilleure acuité.

En vision des bâtonnets interviennent toujours de petits nombres de quanta pour chaque élément, et le nombre total de molécules de rhodopsine dans chaque bâtonnet diminue à peine par blanchiment, même au niveau supérieur de la gamme d'illuminations qui correspond normalement à la vision des bâtonnets. Vers l'extrémité

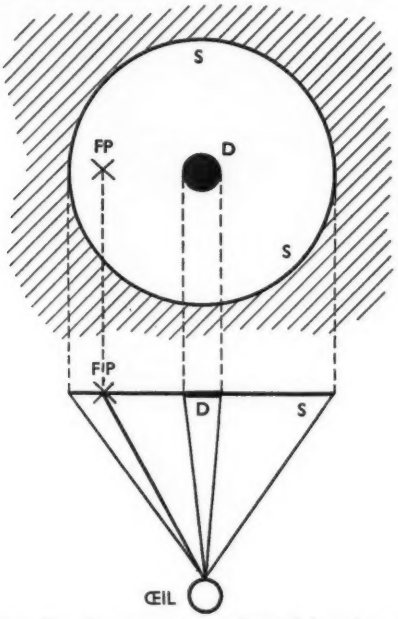


FIGURE 8 – *Arrangement expérimental pour la méthode de «fixation et éclair».*

inférieure de cette gamme, la proportion de bâtonnets réellement excités par la lumière par unité de temps est très faible. L'unité de temps à utiliser n'est sans doute pas inférieure à 0,1 seconde; c'est la valeur approximative du temps d'action physiologique déduite d'expériences de sommation temporelle au niveau du seuil absolu. Pour des durées d'exposition inférieures ou égales à ce temps d'action physiologique, la somme totale moyenne de lumière envoyée à l'œil est le facteur déterminant. Pour des durées plus importantes, la quantité de lumière nécessaire pour déclancher une réponse au seuil augmente. Si l'on suppose que l'effet d'un quantum sur un bâtonnet dure également 0,1 seconde, on peut dire que dans le cas de plages étendues — au cours de longues durées, disons de l'ordre d'une minute, aux faibles luminances — les bâtonnets recevant «l'image rétinienne» de la plage sont la plupart du temps complètement non excités. Si, en moyenne, un bâtonnet absorbe un quantum toutes les dix minutes ou à peu près, ce qui correspond à une nuit très noire, il ne sera dans un état d'excitation que pendant 0,1 seconde environ toutes les dix minutes. Cependant, certaines expériences suggèrent que l'absorption de la lumière par la rétine peut, même pour des intensités proches du seuil absolu, conduire à certains types de réactions physiologiques durant jusqu'à 5 ou 10 secondes

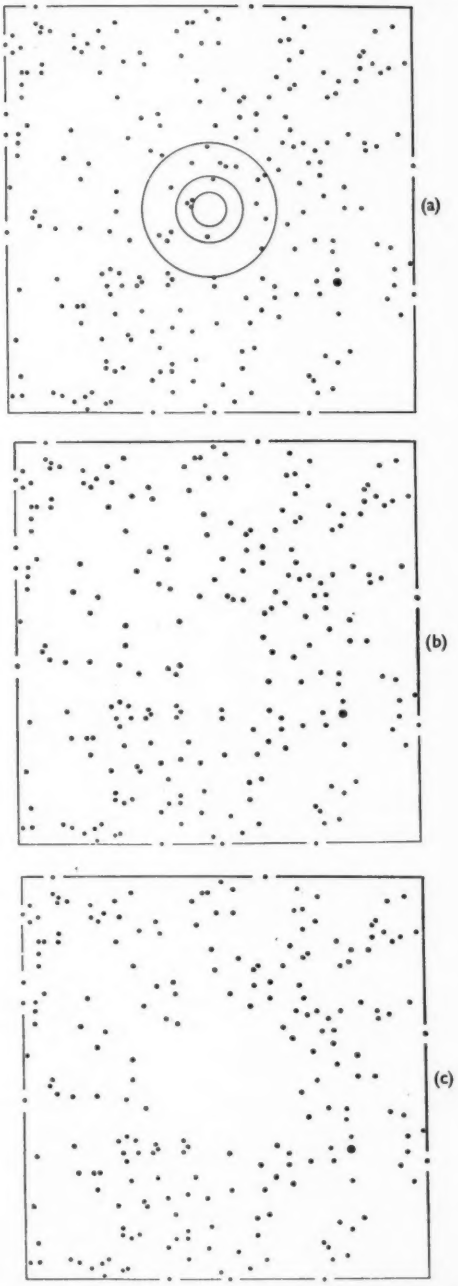


FIGURE 9 – (*a*) *Distribution au hasard calculée pour* 250 *points dans une région divisée en* 10 000 *cases identiques.* (*Le gros point noir indique deux points qui sont tombés dans la même case.*) *Les grands cercles concentriques au milieu du diagramme représentent l'étendue des images rétiniennes de trois disques noirs de diamètres croissants.* (b) *et* (c) *Même distribution de quanta modifiée par la présence des images sombres des deux plus grands disques.*

[18]. La stimulation d'un bâtonnet par un quantum dure peut-être aussi longtemps, mais même dans ce cas elle ne peut exister que pendant une fraction du temps aux intensités faibles. Comme on le verra plus tard, des expériences faites avec de longues durées d'illumination et l'œil libre de se mouvoir de manière ordinaire font sans doute intervenir des mécanismes physiologiques complexes. Pour cette raison, des expériences effectuées avec des éclairs brefs, de durée inférieure à 0,1 seconde, sont souvent plus faciles à interpréter que des expériences effectuées avec de longues durées, mais elles ne correspondent plus exactement aux conditions de vision ordinaire.

ACUITÉ EN VISION DES BÂTONNETS, RELATION AVEC LE NIVEAU D'ÉCLAIREMENT

Le fait bien connu que l'acuité visuelle — c'est-à-dire le pouvoir résolvant de l'œil, ou capacité de perception des détails — augmente avec l'intensité de la lumière pour des objets tests tels que l'anneau noir de Landolt, est resté longtemps sans explication satisfaisante. D'aucuns pourraient dire qu'il est évident que nous ne pouvons pas bien voir lorsqu'il n'y a pas assez de lumière; la théorie quantique montre qu'il y a en fait une grande part de vérité dans cet argument apparemment tautologique. Car, aux faibles intensités, la petitesse du nombre de quanta agissant sur les récepteurs doit conduire à une limite inférieure naturelle pour la dimension du plus petit objet noir, ou détail d'objet, perceptible à un niveau d'intensité donné. La limite effective ne semble pas être beaucoup plus élevée que celle qui est due aux propriétés de la lumière elle-même.

Dans certaines expériences sur l'acuité visuelle des bâtonnets, faites avec un disque noir disposé au milieu d'une grande plage illuminée, la tâche du sujet était simplement de détecter la présence du disque, l'un des objets les plus simples utilisés dans l'étude de l'acuité de la vision. Nous avons discuté le cas d'un objet plus complexe, l'anneau de Landolt, en partie parce qu'il s'agit d'un test type pour mesurer l'acuité visuelle en lunetterie. A l'aide d'un point de fixation (figure 8) la plage lumineuse et le test objet noir sont présentés ensemble pendant des éclairs de quelques millisecondes. Le sujet fixait son regard sur un petit point lumineux rouge, FP, juste visible dans l'obscurité. Puisque l'image du point de fixation FP se formait toujours au milieu de la fovéa, la rétine était fixée dans l'espace, aux imprécisions de fixation près, de l'ordre de quelques minutes d'arc, sans importance dans les expériences actuelles. Le sujet actionnait l'obturateur et annonçait si oui ou non il avait vu le disque noir D, disque qu'à des fins de contrôle on retirait du champ au cours de certains essais, sans que le sujet le sache. Ces expériences étaient faites pour un œil adapté à l'obscurité, et on laissait l'adaptation se rétablir entre les éclairs. Par conséquent, l'expérience dans son ensemble se rapporte à un état physiologique constant du système visuel.

L'appareillage est disposé de telle sorte que la plage blanche S entourant le disque noir, est éclairée uniformément, et cependant les quanta réellement absorbés par les bâtonnets à chaque éclair sont répartis au hasard et forment sur la rétine une figure du type indiqué figure 9. La distribution au hasard des quanta sur la rétine est bien entendu différente pour chaque éclair, bien que la même répartition ait été utilisée dans tous les diagrammes de la figure 9. Il est évident que l'image sombre d'un disque noir ne sera pas perceptible si son diamètre est petit comparé à la distance moyenne séparant deux quanta voisins absorbés. Dans ce cas, les figures des distributions au hasard des quanta absorbés, formées lorsque le disque est présent, seront en pratique indiscernables des figures qu'on réaliserait lorsqu'il n'y a pas de disque noir au milieu de la plage. Pour chaque éclair, entre les bâtonnets qui ont absorbé un quantum (ou quelquefois plus d'un quantum), se trouvent des éléments de surface rétinienne complètement non stimulés par la lumière. La présence ou l'absence d'une «ombre» noire sur ces éléments ne peut être décelée par cette expérience.

Théoriquement, la détection du disque noir devrait être possible lorsqu'il produit sur la rétine une ombre plus étendue que les régions non stimulées rencontrées naturellement entre les quanta absorbés. La situation peut être illustrée par comparaison avec une route sèche sur laquelle seraient tombées quelques gouttes de pluie dispersées. Si un objet important, tel qu'une voiture, est alors déplacé, sa position antérieure sera discernable par l'absence de gouttes de pluie, mais ce ne serait pas le cas si l'on ramassait sur la route un petit objet tel qu'un caillou.

Ainsi, la répartition quantique de l'excitation rétinienne établit une limite naturelle à la précision de la vision, dans ces expériences. Il faut s'attendre à ce que des objets noirs plus petits soient discernables lorsque l'intensité de l'éclair augmente, puisque le nombre moyen de quanta absorbés par unité d'aire de la rétine est alors plus grand.

Les résultats expérimentaux sont en accord qualitatif avec cette prévision; mais il est généralement admis qu'un quantum actif n'est pas suffisant pour que l'œil détecte un stimulus lumineux. La limite théorique de précision de la vision qui vient d'être discutée est une limite supérieure que nous ne pouvons en fait espérer atteindre.

Si un quantum actif était suffisant dans la vision, le stimulus lumineux serait perceptible quand un quantum au moins aurait été absorbé et aurait agi sur un bâtonnet en un point quelconque de la rétine. La statistique montre que la probabilité de cette situation dépend seulement du nombre total moyen de quanta absorbés par les bâtonnets, et est indépendante de la surface, ou des surfaces de la rétine qui interviennent, et de la distribution des stimuli au cours du temps. Dès lors, si un quantum était suffisant pour déclancher la vision, le résultat des expériences au seuil absolu (détection d'un stimulus lumineux sur fond d'intensité nulle) serait le même que s'il y avait «sommation physiologique» complète (voir plus loin) par le système visuel dans l'espace et le temps, tandis qu'en fait on observe que la sommation ne se produit que sur une surface limitée et pendant un temps limité. La quantité totale de lumière nécessaire pour la perception, définie par le réglage de l'appareil et les conditions de l'expérience, n'est pas indépendante de la surface ni du temps. De plus, elle est plus grande quand on se sert des deux yeux au lieu d'un [19], alors que pour la «vision d'un quantum» on s'attendrait à ce qu'elle soit environ la même pour un ou deux yeux, même quand les deux yeux appartiennent à deux sujets humains différents qui répondent indépendamment l'un de l'autre [13].

Il nous faut conclure que plusieurs quanta actifs sont nécessaires pour la vision, et que ces quanta doivent être absorbés à l'intérieur d'une surface rétinienne limitée. Ils doivent aussi être absorbés au cours d'une période de durée inférieure à 0,1 seconde, condition qui est remplie dans le cas de brefs éclairs comme dans les expériences sur l'acuité décrites plus haut.

Deux points lumineux placés à des distances variables peuvent être utilisé pour étudier la sommation spatiale sur la rétine. Si la distance angulaire de ces points est d'environ 20′ d'arc ou moins dans la périphérie, leurs effets s'ajoutent dans une certaine mesure et il y a au moins sommation physiologique partielle. Quand les deux points sont suffisamment proches l'un de l'autre, le seuil n'est déterminé que par la quantité totale de lumière émise par ces deux points; il y a alors sommation physiologique complète. Si les deux points sont très éloignés, il y a encore plus de chances de percevoir au moins l'un des points lorsqu'on les présente ensemble que lorsqu'on les présente séparément. Le même accroissement de probabilité de perception est constaté lorsqu'un seul point est présenté à deux observateurs, le point étant considéré perçu si l'un des observateurs l'a discerné; dans ce cas il n'y a que «sommation de probabilité» et non sommation physiologique. Au seuil, les yeux d'un même sujet répondent à peu près suivant une sommation de probabilité [19].

Le domaine de sommation physiologique des effets des quanta lumineux absorbés par la rétine adaptée à l'obscurité est donc limité. Au lieu de considérer des quanta isolés ou plutôt des bâtonnets isolés qui auraient été stimulés, chacun par un quantum au moins, dans la figure d'excitation, il nous faut considérer des «unités visuelles» fonctionnelles contenant chacune plusieurs bâtonnets. Pour chaque unité, ces bâtonnets pourraient simplement être ceux qui sont reliés à une fibre du nerf optique (figure 12); il est également possible

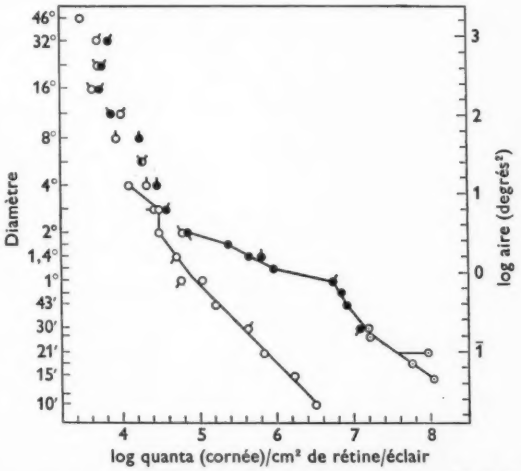


FIGURE 10 – *Résultats des mesures faites par la méthode de la figure 8 avec des disques noirs de différents diamètres (points noirs) et mesures de seuils absolus faites dans des conditions identiques avec des champs lumineux présentés sur un fond d'intensité nulle (anneaux). Tous les objets tests sont centrés à 20° du point de fixation. L'éclair lumineux dure 0,0026 seconde. La bande spectrale est centrée sur 507 mμ. Les disques noirs plus petits que 15′ d'arc ne sont pas visibles, même aux intensités élevées. La droite à 45° tracée à travers les anneaux pour les plages de faibles diamètres correspond à une sommation complète, c'est-à-dire à une quantité totale de lumière entrant dans l'œil constante au seuil, indépendamment de la surface du champ lumineux test. (D'après P. E. Hallett* [20].)

que la convergence effective se produise à d'autres niveaux du système nerveux, dans le cerveau par exemple. Chacune de ces unités sera stimulée quand elle aura absorbé un certain nombre de quanta; on admet généralement que le nombre est au moins égal à deux et ne dépasse probablement pas une dizaine environ.

En supposant, pour des raisons de simplicité, que nous travaillons dans une région homogène de la rétine — hypothèse qui n'est jamais vérifiée pour des surfaces rétiniennes de l'étendue considérée ici — on peut tenter d'interpréter théoriquement ces expériences en supposant que les points des diagrammes de la figure 9 correspondent, non pas à des quanta absorbés isolés, mais à des unités visuelles indépendantes qui auraient absorbé, chacune, suffisamment de quanta pour être excitée. Ce qui importe ici est le nombre des unités visuelles qui ont reçu un nombre de quanta suffisant pour les stimuler par rapport au nombre de celles dont le seuil absolu n'est pas atteint.

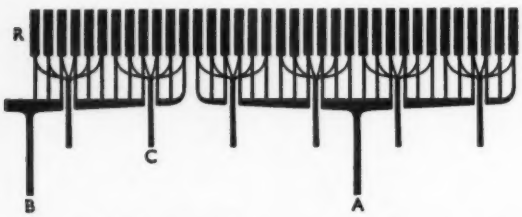


FIGURE 11 – *Diagramme schématique indiquant un type possible de connexions nerveuses suivant lequel les récepteurs rétiniens (R) identiques seraient organisés en unités fonctionnelles de différentes dimensions. Les unités les plus petites (C) auraient un seuil plus élevé, en termes d'éclairement rétinien par unité d'aire, que les grandes unités (A ou B), puisque chacune d'elles recueillerait de l'énergie seulement à partir d'une petite surface. (D'après Pirenne et Denton* [21].)

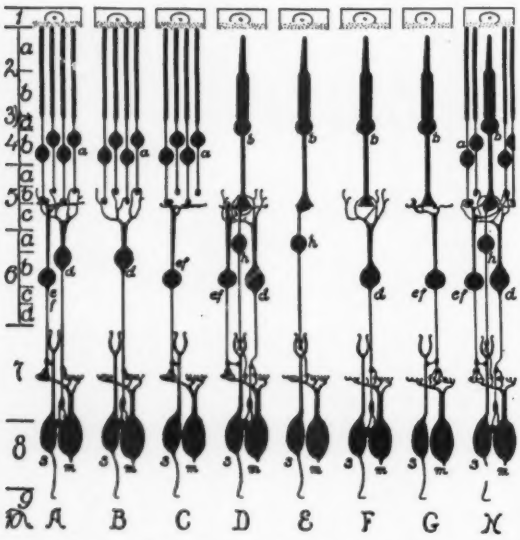


FIGURE 12 – *Types de connexion observés anatomiquement entre les récepteurs, cônes et bâtonnets, et les fibres du nerf optique. A, B et C montrent comment un nerf optique peut être relié à plusieurs bâtonnets. Le nombre effectif de bâtonnets ainsi reliés peut atteindre des dizaines de milliers. (D'après S. Polyak* [22], *copyright* (1941) *de l'*University of Chicago Press.)

On notera qu'à ce stade, nous ne nous occupons pas seulement de la distribution des quanta actifs parmi les récepteurs, à la périphérie extrême du système nerveux visuel, mais aussi du problème de l'organisation fonctionnelle de la rétine humaine et du système visuel. Sur cette question complexe, on possède relativement peu de renseignements quantitatifs.

EXPLICATION THÉORIQUE DES EXPÉRIENCES D'ACUITÉ

Du fait des fluctuations quantiques, la répartition des unités visuelles sera irrégulière et variera d'un éclair à l'autre. Elle ressemblera donc à la répartition des points sur la figure 9, mais ici la grandeur des unités est un facteur important. Il est probable que dans la rétine humaine, ces unités empiètent les unes sur les autres, mais ce point est mal connu. Il est clair qu'on doit s'attendre à une complexité considérable dans l'aspect quantitatif de la théorie dans le cas où les éclairs sont assez intenses pour provoquer l'excitation d'une forte proportion des unités et lorsque la surface de l'image du test est du même ordre que celle de l'unité, en particulier quand l'image ne recouvre vraisemblablement que partiellement certaines unités. Cependant, si les unités sont clairsemées et peu nombreuses, ces difficultés ne surgissent pas. Aux basses luminances, le seuil de visibilité, défini par l'intensité lumineuse par unité d'aire, est à peu près le même dans la détection d'un disque noir que dans celle d'une plage circulaire lumineuse de même surface. Ce dernier arrangement correspond au négatif du précédent au sens photographique. Aux luminances plus élevées, les courbes de seuil de visibilité d'un disque et d'un cercle lumineux divergent, indiquant l'apparition d'autres complications (figure 10).

La coïncidence des deux courbes aux faibles luminances confirme cette théorie, puisqu'elle montre que l'énergie moyenne de la lumière qui atteindrait la rétine en l'absence du disque noir est la même que celle nécessaire à la détection d'un

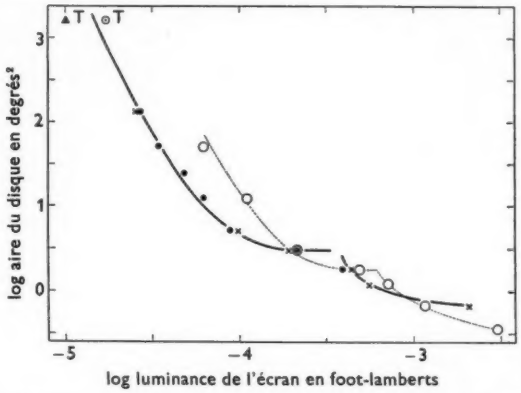


FIGURE 13 – *Résultats d'expériences semblables à celles des disques noirs de la figure* 10, *pour un autre sujet. Les résultats sont donnés pour deux positions rétiniennes, à* 20° (*trait plein*) *et à* 10° (*pointillé*), *du point de fixation. Les expériences ont été faites en lumière blanche, la durée des éclairs était de* 0,03 *seconde.* (*D'après Pirenne* [23].)

disque lumineux de même surface. De plus, dans la courbe relative aux expériences à disque noir, une coupure apparaît pour une valeur de l'aire du disque qui est du même ordre que celle à l'intérieur de laquelle on trouve une sommation complète, dans le cas d'un disque lumineux présenté sur un fond d'intensité nulle (figure 10). Cette aire fournit probablement l'ordre de grandeur des aires des unités visuelles mises en jeu.

Différentes raisons permettent de supposer que les mêmes bâtonnets rétiniens sont arrangés de telle façon qu'ils constituent à la fois de grandes et de petites unités; mais pratiquement, aux niveaux de luminance faible, seules les grandes unités sont susceptibles de répondre, très peu de petites unités recevant alors assez de quanta pour être stimulées (figure 11). On s'attendrait donc à trouver un recrutement progressif des grandes unités avec l'accroissement de luminance de l'éclair, puis, lorsqu'elle sont toutes stimulées, un recrutement progressif d'unités plus petites. Finalement les plus petites unités de la périphérie rétinienne, formées uniquement de cônes, ou de cônes et de bâtonnets, doivent devenir excitées.

La figure 13 se rapporte à expériences antérieures, faites avec un autre sujet. Les résultats sont différents à 20° et à 10° de la fovéa; ce qui a été observé aussi dans d'autres expériences faites sur le sujet de la figure 10. Même dans la périphérie de la rétine, les propriétés du système visuel varient beaucoup d'une position à l'autre.

Bien que les résultats des figures 10 et 13 soient semblables dans l'ensemble, ils comportent des différences, qui sont probablement dues à des différences de conditions expérimentales, ou peut-être à des différences entre les yeux des sujets. De telles expériences sont difficiles et nécessitent des précautions spéciales, notamment pour empêcher l'expérimentateur d'influencer inconsciemment les réponses du sujet.

LES APPARENCES SUBJECTIVES

Dans les expériences relatives au seuil absolu mettant en jeu une plage lumineuse étendue dont la présence peut être décelée sur fond d'intensité nulle, il est tentant de supposer que la plage est juste visible lorsqu'une seule des unités visuelles recouverte par l'image rétinienne est stimulée. Bien que l'hypothèse ait souvent été avancée, il n'en existe aucune preuve. La théorie des «deux quanta» de van der Velden [12] et Bouman [30] est fondée sur l'hypothèse que la condition de perception est remplie lorsqu'une unité visuelle a reçu au moins deux quanta, ce nombre deux étant fixé par la théorie. D'autre part, une théorie plus élaborée a été avancée par Baumgardt [25], d'après laquelle la perception d'une plage test dépend d'arrangements de «coïncidences» plus compliqués que l'hypothèse des unités visuelles physiologiquement indépendantes développée plus haut.

On pourrait penser que lorsqu'une seule, ou deux ou trois unités sont excitées à l'intérieur de la surface correspondant à une plage test relativement étendue, le sujet devrait voir une, deux ou trois taches lumineuses distinctes dans des positions définies. Mais il est notoire que ce genre de raisonnement est très aléatoire; il n'y aurait pas d'utilité à ce que nous «voyions» la stimulation nerveuse qui se produit effectivement dans notre rétine. Des expériences ont été faites dans lesquelles on présentait au sujet (*a*) une plage circulaire étendue exposée à des éclairs correspondant à des luminances fixes, proches du seuil; (*b*) la moitié supérieure de la plage seulement; (*c*) la partie inférieure de la plage [26]. Les conditions expérimentales restaient les mêmes, y compris la luminance de la plage, et la séquence de présentation de (*a*), (*b*) et (*c*) n'était pas connue du sujet.

Le sujet confondait alors les demi-plages (*b*) ou (*c*) et la plage complète (*a*); il prenait parfois une demi-plage pour la plage complète. Ceci reste en accord avec la théorie, suivant laquelle quelques-unes seulement, peut-être même une seule unité visuelle couverte par la plage serait stimulée au seuil. On doit s'attendre alors à ce que l'excitation due à la plage complète soit parfois confinée,

disons, à la partie supérieure seule, et ceci explique les confusions qui se sont produites.

Il serait plus simple de montrer que la plage complète peut être confondue avec une petite plage couvrant une surface ayant les dimensions approximatives de la surface rétinienne à l'intérieur de laquelle il y a sommation physiologique, ou de montrer qu'on peut la confondre avec plusieurs groupements de tels éléments de surface. Mais le même luminance doit être employée pour la plage complète et pour les petites plages. Si une luminance plus élevée est utilisé pour les petites plages, l'excitation des unités visuelles intéressées sera probablement plus élevée, et ceci pourra introduire une différence notable entre les deux modes d'excitation: il est clair que quelques points lumineux réellement brillants ne sont pas confondus avec une plage étendue. C'est alors qu'une difficulté se présente: si l'on emploie une ou quelques petites plages de luminance proche du seuil de la plage étendue (50% de perception), le sujet voit ces plages si rarement qu'il n'a presque jamais l'occasion de comparer leur aspect avec celui de la plage étendue.

Dans le cas des expériences avec le disque noir, on ne voit pas le champ lumineux comme une répartition de taches lumineuses. Les régions non stimulées que prévoit la théorie, ne sont pas perçues subjectivement. A des luminances supérieures à celles qui rendent juste visible une grande plage éclairée, mais inférieure à la luminance nécessaire pour voir le disque noir, le disque reste, bien entendu, complètement invisible. Cependant, subjectivement, la plage peut alors apparaître brillante et éclairée très uniformément. Il en est ainsi par exemple pour un disque noir d'un degré de diamètre, soit deux fois le diamètre angulaire du soleil; s'il se base sur l'apparence subjective du champ, un sujet qui n'est pas habitué à ces expériences peut avoir peine à croire qu'il a vraiment manqué de voir un objet d'aussi grandes dimensions.

Une des difficultés des expériences sur le seuil absolu est que le sujet doit éviter de confondre la plage test avec les nuages lumineux constamment variables, les phosphènes, qui sont visibles subjectivement dans l'obscurité totale. Quelques sujets sont beaucoup moins à la merci des phosphènes que d'autres, mais de toute manière, en règle générale, l'obscurité totale n'apparaît jamais complètement noire pour l'œil adapté à l'obscurité. Le champ visuel est rempli par l'*Eigenlicht*, la lumière propre de l'œil. Sans doute les phosphènes sont-ils dus à quelque forme d'activité spontanée dans le système nerveux, mais leur origine exacte est incertaine. Peut-être sont-ils dus au «bruit noir» qui, selon certaines théories [23], existerait dans le système visuel humain. Ce bruit consisterait en une activité nerveuse spontanée dont les caractéristiques ne peuvent être distinguées de celle de l'activité causée par l'action de la lumière sur la rétine. Par exemple, il pourrait être dû à l'activation thermique des molécules de rhodopsine dans les bâtonnets, dans l'hypothèse qu'une telle activation produise les mêmes effets que l'activation due à l'absorption réelle de lumière. Il n'y a aucune raison de supposer que dans l'obscurité absolue un tel bruit doive nécessairement conduire à des sensations lumineuses, puisque celles-ci ne seraient apparemment d'aucune utilité biologique. Mais puisque, par définition, le bruit serait de même espèce que la stimulation nerveuse causée par la lumière, il interférerait nécessairement avec la détection de stimuli lumineux réels, quand son niveau est suffisamment élevé. Ceci pourrait expliquer pourquoi plus d'un quantum actif est nécessaire pour la vision — mais les étranges effets qui se produiraient alors en ce qui concerne la sommation pouvaient aussi rendre la vision d'un quantum biologiquement inutile. A l'heure actuelle, il ne semble pas qu'il existe aucune preuve convaincante de la présence ou de l'absence d'un tel bruit à un niveau d'intensité capable d'influencer la vision humaine.

CONCLUSION

La plupart des expériences discutées précédemment ont été effectuées avec des éclairs lumineux de courte durée. En ce qui concerne l'acuité visuelle, les processus intervenant en vision ordinaire sont probablement beaucoup plus complexes. La rétine s'adapte alors à l'éclairement prédominant, et l'œil est continuellement soumis à des mouvements saccadés avec des pauses de fixation de l'ordre de 0,1 à 0,2 seconde. Dans ces conditions, il est probable que la perception des objets sombres fait intervenir des réponses «*off*» dans le système visuel; c'est-à-dire des réponses nerveuses qui se produisent lorsque l'éclairement de la rétine est soudainement arrêté. De telles réponses ont été observées dans le cas de préparations électrophysiologiques d'yeux de vertébrés, par exemple, dans les fibres du nerf optique de la grenouille [28]. Il est probable qu'elles se produisent aussi dans la rétine humaine, lorsque, à la suite d'un déplacement de l'œil, l'image d'un objet sombre tombe soudainement dans une

région initialement éclairée. Il faut se rappeler à ce propos que de nombreuses expériences indiquent que la stimulation de la rétine dans des conditions qui sont maintenues tout à fait stables conduit à une vision très inefficiente, ou à une perte complète de la vision au bout de quelques secondes. On peut donc soupçonner que lorsque l'œil est placé devant un champ étendu uniformément éclairé, la région centrale de ce champ devient rapidement inefficiente visuellement, puisque c'est seulement au bord d'un champ étendu que les mouvements de l'œil produisent des changements d'illumination. S'il en est ainsi, lorsque l'œil essaye de détecter un petit objet noir au centre d'une grande plage, les déplacements de l'image sombre de l'objet sur la rétine seraient les seuls agents capables de stimuler le système visuel. Il y a des raisons de croire que sur l'ensemble du domaine de la vision par bâtonnets, et pour une grande partie de la vision par cônes, le facteur déterminant dans la réponse du système visuel à la limite de visibilité des objets noirs réside dans la suppression soudaine de l'illumination rétinienne lors des déplacements saccadés de l'œil [29].

REMERCIEMENTS

Une partie du travail expérimental décrit dans cet article a été financé par le *Medical Research Council*, la Fondation Nuffield et le *United States Public Health Service*.

BIBLIOGRAPHIE

[1] STILES, W. S. «The physical interpretation of the spectral sensitivity curve of the eye». Dans «Transactions of the Optical Convention of the Worshipful Company of Spectacle Makers», p. 97. Spectacle Makers' Company, Londres. 1948.
[2] SCHULTZE, M. *Arch. Mikr. Anat.*, **2**, 175, 1866.
[3] STILES, W. S. *Proc. roy. Soc., B*, **127**, 64, 1939.
[4] RUSHTON, W. A. H. *Progr. Biophys.*, **9**, 239, 1959.
[5] STILES, W. S. *Ann. R. Coll. Surg. Engl.*, 1961. (Sous presse.)
[6] STILES, W. S. et CRAWFORD, B. H. *Proc. roy. Soc., B.*, **112**, 428, 1933.
[7] STILES, W. S. *Sci. Progr.*, **33**, 676, 1939.
[8] FLAMANT, F. et STILES, W. S. *J. Physiol.*, **107**, 187, 1948.
[9] PIRENNE, M. H., MARRIOTT, F. H. C. et O'DOHERTY, E. F. *Spec. Rep. Ser. med. Res. Coun. Lond.*, No. 294, 1957.
[10] HECHT, S., SHLAER, S. et PIRENNE, M. H. *J. gen. Physiol.*, **25**, 819, 1942.
[11] BRUMBERG, E. M., VAVILOV, S. I. et SVERDLOV, Z. M. *J. Phys. Moscow*, **7**, 1, 1943.
[12] VAN DER VELDEN, H. A. *Physica*, **11**, 179, 1944.
[13] PIRENNE, M. H. *Progr. Biophys.*, **2**, 192, 1951
[14] PIRENNE, M. H. et MARRIOTT, F. H. C. Dans «Psychology: A Study of a Science. Study 1. Conceptual and Systematic, *Vol.* 1. Sensory, Perceptual, and Physiological Formulations». Pp. 288–361. McGraw-Hill, New-York. 1959.
[15] LUDVIGH, E. et MCCARTHY, E. F. *Arch. Ophthal. N.Y.*, **20**, 37, 1938.
[16] RUSHTON, W. A. H. *J. Physiol.*, **134**, 30, 1956.
[17] BAUMGARDT, E. «Les théories photochimiques classiques et quantiques de la vision et l'inhibition nerveuse en vision luminaire». Editions de la Revue d'Optique, Paris. 1950.
[18] Ref. [14], p. 56.
[19] PIRENNE, M. H. *Nature, Lond.*, **152**, 698, 1943.
[20] HALLETT, P. E. *Proc. 3rd Int. Congr. Photobiol.*, Copenhague. (Sous presse.)
[21] PIRENNE, M. H. et DENTON, E. J. *Nature, Lond.*, **170**, 1039, 1952.
[22] POLYAK, S. L. «The Retina». University of Chicago Press, Chicago. 1941.
[23] PIRENNE, M. H. *Proc. Camb. phil. Soc.*, **42**, 78, 1946.
[24] PIÉRON, H. Dans «Mechanisms of Colour Discrimination», p. 15. Pergamon Press, Londres. 1960.
[25] BAUMGARDT, E. *Proc. Int. Illum. Comm. XIV* Session, Bruxelles. Vol. A, p. 78, 1959.
[26] PIRENNE, M. H. *J. Physiol.*, **107**, 47*P*, 1948.
[27] BARLOW, H. B. *Ibid.*, **141**, 337, 1958.
[28] HARTLINE, H. K. *Amer. J. Physiol.*, **121**, 400, 1938.
[29] PIRENNE, M. H. *Ann. N.Y. Acad. Sci.*, **74**, 377, 1958. MARRIOTT F. H. C. et PIRENNE, M. H. *J. Physiol.*, **152**, 24P, 1960.
[30] BOUMAN, M. A. *Studium gen.*, **13**, 491, 1960.
[31] CRAWFORD, B. H. *Proc. Phys. Soc. Lond., B*, **62**, 321, 1949.
[32] *Proc. Int. Illum. Comm.*, **3**, 32, 1951.
[33] CRESCITELLI, F. et DARTNESS, H. J. A. *Nature. Lond.*, **172**, 195, 1953.
[34] SHLAER, S. *J. gen. Physiol.*, **21**, 165, 1937.

OUVRAGES GÉNERAUX

PIRENNE, M. H. «Vision and the Eye». Chapman and Hall Ltd., Londres. 1948.
Idem. Biol. Rev., **31**, 194, 1956.
MARRIOTT, F. H. C. *Symp. zool. Soc. Lond.*, No. 3, 67, 1960.
BRINDLEY, G. S. «Physiology of the Retina and Visual Pathway». Edward Arnold, Londres. 1960.
PIRENNE, M. H. et MARRIOTT, F. H. C. «Visual Functions in Man». Dans «The Eye», H. Davson (éditeur). Academic Press, Londres et New-York. (Sous presse.)
National Physical Laboratory Symposium No. 8, «Visual Problems of Colour». 2 vols. Her Majesty's Stationery Office, Londres. 1958.
DARTNALL, H. J. A. «The Visual Pigments». Methuen & Co. Ltd., Londres. 1957.

Sir James Hall, Bt. (1761–1832)

par V. A. EYLES

Sir James Hall était en même temps l'ami de Lavoisier et de James Hutton, qui fut le premier géologue à avancer la théorie moderne de l'origine des roches ignées. Hall réalisa plusieurs expériences chimiques afin de vérifier la validité de cette théorie en essayant de reproduire des températures et des pressions souterraines; il a été le premier géologue à utiliser ces techniques avec succès. Le présent article décrit ces expériences et les résultats obtenus.

Né le 17 janvier 1761, Sir James Hall (figure 1) a été le premier à appliquer avec succès les techniques expérimentales de la chimie aux problèmes géologiques. Les expériences de Hall s'effectuèrent entre 1798 et 1804, à une époque où l'application de telles méthodes par des géologues était pratiquement inconnue; elles avaient pour objet de contrôler les théories de son ami Hutton qui, dès 1785, avait annoncé la publication de son ouvrage *Theory of the Earth* [1].

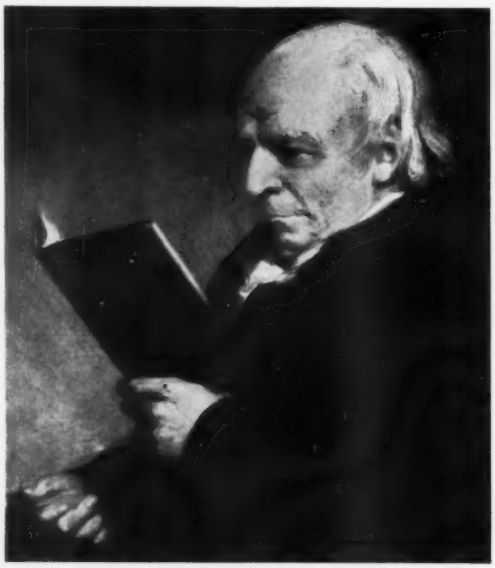


FIGURE 1 – *Sir James Hall, Bt., F.R.S., par Sir John J. Watson-Gordon, R.A.*

Un bref aperçu de la carrière de Hall expliquera comment il a été amené à s'occuper des problèmes de Hutton. Il provenait d'une vieille famille écossaise. A l'âge de douze ans il fut envoyé à l'école à Londres, et à quinze ans il succéda au titre de baronnet. Sir John Pringle, son grand-oncle, alors Président de la *Royal Society*, l'invita à dîner au Club de la Société à Londres. Il se peut que l'intérêt de Hall pour la science remonte à cette époque, mais il est plus probable qu'il avait déjà rencontré Hutton, un voisin et ami de son père. En 1777 Hall fut admis au *Christ's College* de Cambridge; il y resta en résidence deux ans sans prendre ses diplômes. Après avoir quitté Cambridge il continua ses études en France, puis à Genève. En 1782 il revint en Ecosse à l'occasion de sa majorité. En 1783 il repartit à l'étranger et voyagea en Europe pendant trois ans environ. Il était maintenant vivement intéressé par la géologie: il visita le Vésuve, les volcans de Sicile et les îles Lipari. L'éminent géologue français Déodat Dolomieu l'accompagna en Sicile. Hall étudia soigneusement le Vésuve et le Mont Somma voisin; les croquis et les notes qu'il amassa sur place devaient lui servir plus tard quand il se mit à examiner la géologie de l'Ecosse. En 1786 il séjourna quelques mois à Paris. Il y rencontra Lavoisier à maintes reprises et il adopta les théories chimiques de ce dernier.

En novembre 1786 il revint à Edimbourg et épousa Lady Helen Douglas. Au début de 1788, il prit la parole à la *Royal Society* d'Edimbourg pour exposer la nouvelle théorie chimique de Lavoisier. Cette communication, qui occupa trois séances, suscita à la fois de l'intérêt et de l'opposition; les séances suivantes furent consacrées à l'exposé de la théorie du phlogiston par Hutton et à une réponse de Hall. Le discours de Hall ne fut pas publié, mais Robert Kerr, le traducteur du «Traité élémentaire de chimie» de Lavoisier, le mentionne dans une lettre du 21 janvier 1791 à Lavoisier. Il rapporte que Hall avait donné un compte rendu détaillé de la doctrine de Lavoisier à la Société Royale d'Edimbourg et avait converti quelques personnes, y compris Kerr lui-même, à la théorie antiphlogistique [2]. Ce document prouve que Hall fut l'un des premiers défenseurs des doctrines de Lavoisier en Grande-Bretagne. Dès l'université, il s'intéressait déjà beaucoup à la

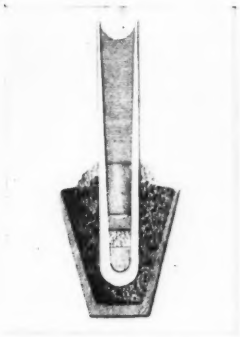


FIGURE 2 – *Tubes de porcelaine utilisés dans le deuxième cycle d'essais sur la compression.*

FIGURE 3 – *Creuset original utilisé par Hall pour ses expériences sur le «trapp», montrant le verre formé quand on refroidit rapidement une masse de roches ignées fondues (hauteur 6 cm environ).*

FIGURE 4 – *Un creuset analogue montrant la masse cristalline obtenue par refroidissement lent.*

FIGURE 5 – *Barre de fer forée, avec bouchon. La longueur de la cavité est de 7,5 cm.*

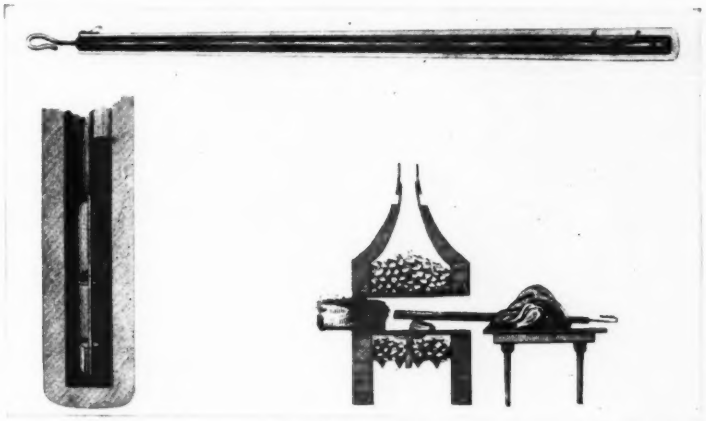


FIGURE 6 – *Premiers appareils utilisés pour les expériences de Hall sur la compression.*

FIGURE 7 – *Barre forée (37 cm de long).*

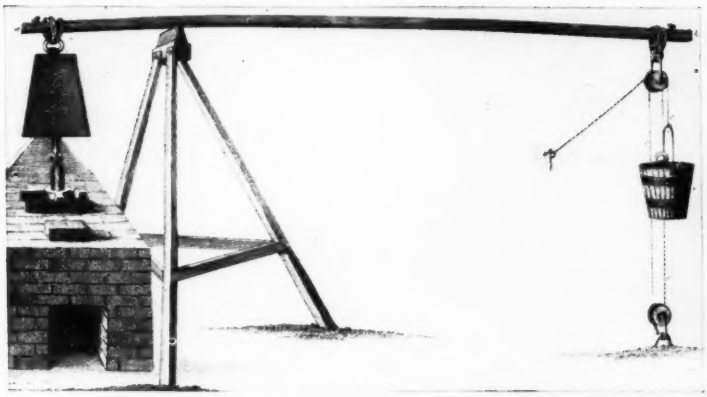


FIGURE 8 – *Appareil employé par Hall pour déterminer la pression dégagée. Un poids très lourd s'appuie sur l'extrémité ouverte d'un tube rempli d'un métal fusible; la lecture s'effectue quand la force d'expansion du gaz dégagé commence à soulever le poids. La mise au point s'opère au moyen de contrepoids placés dans le seau attaché à l'extrémité du madrier.*

FIGURE 9 – *Section mince d'un des «trapps» employés par Hall, avec la texture cristalline typique avant la fusion.*

FIGURE 10 – *Section d'une coulée ignée lentement refroidie montrant les cristallites au sein d'une masse vitreuse.*

FIGURE 11 – *Coulée ignée refroidie lentement. La texture n'est pas caractéristique du trapp non fondu (voir figure 9). (Les figures 9–11 ont été très grossies.)*

FIGURE 12 – *Echantillon de «marbre» obtenu dans une expérience de Hall.*

FIGURE 13 – *Tube de porcelaine sectionné après une expérience.*

chimie et il avait suivi les conférences de Joseph Black à Edimbourg.

C'est à cette époque, en 1788, que le premier exposé complet de la *Theory* de Hutton fut publié. La première réaction de Hall fut défavorable. Il dit plus tard que son premier mouvement avait été de rejeter la théorie, et il l'aurait certainement fait s'il n'en avait connu l'auteur, dont la conversation brillante et pénétrante présentait un contraste frappant avec l'obscurité de ses publications. Ce n'est qu'au terme de trois années de conversations presque quotidiennes avec Hutton que Hall adopta les principes de base de cette théorie. La conversion fut fructueuse puisqu'elle l'incita à entreprendre ses expériences classiques.

Afin de pouvoir mesurer la portée de ces expériences il convient de rappeler où en était la géologie à cette époque. On avait déjà recueilli nombre de faits géologiques grâce à l'examen des roches superficielles, à des exploitations minières ou encore à l'étude des minéraux, mais il restait à découvrir un fil conducteur pour coordonner tous les faits connus et en interpréter la signification. Certes, les géologues connaissaient relativement bien les roches sédimentaires — calcaires, schistes et grès — mais ils ne connaissaient pratiquement rien des roches qu'on appelle actuellement les roches ignées: granites, basaltes et porphyres. L'on sait maintenant qu'elles sont venues de l'intérieur de la terre à l'état fondu et se sont solidifiées par la suite. Du temps de Hutton on pensait couramment que ces roches, tout comme les roches sédimentaires, étaient déposées dans l'eau ou s'étaient cristallisées à partir de solutions. C'est d'autant plus extraordinaire qu'on avait assez de données suffisantes sur la solubilité des corps chimiques pour savoir que ces roches sont constituées de minéraux silicatés virtuellement insolubles tels que le quartz et le feldspath. La théorie courante réservait cependant une place spéciale aux laves. En effet, ce terme ne s'appliquait qu'aux roches provenant visiblement de volcans actifs ou de volcans dont l'activité venait de cesser; au reste, les géologues étaient persuadés que ce phénomène était purement local et que la plupart des basaltes d'Europe et d'ailleurs, reconnus actuellement pour être des laves, provenaient de solutions aqueuses. Au début du XIXe siècle certains géologues éminents soutenaient encore cette opinion erronée.

Hutton émit la première explication exacte et générale de l'origine des roches ignées. Il supposa qu'au sein de la croûte terrestre toutes les roches étaient à l'état fondu et qu'une grande masse rocheuse avait gagné les couches supérieures sédimentaires de la surface. Une partie s'y répandit à l'extérieur tandis que le reste s'était solidifié sous terre en donnant des «laves souterraines» (couches planes), des dykes verticaux (veines) ou de grandes masses irrégulières telles que les granites d'Ecosse. La théorie de Hutton sur l'origine des roches ignées marque un tournant décisif dans l'histoire de la géologie; ceux qui la soutenaient furent surnommés «Plutonistes», par opposition aux «Neptuniens» qui partageaient l'opinion ancienne.

La théorie de Hutton a été très critiquée sur quelques points particuliers; nous n'en retiendrons que deux qui avaient une portée considérable à l'époque. Toutes les deux provenaient de l'ignorance de la chimie des roches fondues, ce qui n'est guère surprenant, car le sujet en question est extrêmement complexe.

La première objection avait trait à la fusion des roches ignées. On savait que si l'on faisait fondre des roches ordinaires le refroidissement ne donnait plus des roches cristallines mais un verre. Les Neptuniens prétendaient que si ces roches avaient réellement été à l'état fondu elles auraient formé des verres au lieu de roches cristallines.

L'autre objection reposait sur le fait que le calcaire, ou carbonate de chaux, se décompose sous l'effet de la chaleur en donnant de la chaux vive et de l'anhydride carbonique. Les savants d'Edimbourg le savaient parfaitement puisque Black l'avait démontré. Hutton assurait cependant que les roches du sol avaient autrefois été soulevées vers la surface après avoir été enfouies dans des régions souterraines où il régnait des températures très élevées. Les critiques demandaient pourquoi ces calcaires ne s'étaient pas décomposés.

Hutton répondait en disant que les conditions présentes au sein de la croûte terrestre étaient absolument différentes de celles qui existent à la surface et qu'il serait probablement impossible de les reproduire. Il craignait sans doute que ceux qui essaieraient de le faire pour étayer la théorie feraient plus de tort que de bien si ces expériences n'étaient pas couronnées de succès, mettant en garde ceux qui «jugent les grandes opérations du règne minéral en allumant un feu et en regardant le fond d'un petit creuset».

Hall connaissait bien l'opinion de Hutton, mais il était cependant partisan de procéder à la vérification expérimentale de la théorie. En 1790 il effectua quelques expériences préliminaires, mais il les interrompit par égard pour les convictions de son ami. Hutton mourut en 1797 et Hall reprit ses expériences.

La première expérience concernait le trapp et la lave (*Experiments on Whinstone and Lava*) [3]. Il espérait prouver que si l'on refroidissait lentement une roche fondue l'on obtiendrait une roche cristalline et non une masse vitreuse. Dans son rapport il emploie le terme écossais *whinstone* (trapp) pour désigner des roches, qui, selon le théorie de Hutton, étaient des intrusions ignées, et le terme de «lave» dans le sens restreint de roches éjectées par des volcans. James Keir [4] avait déjà prouvé que le lent refroidissement du verre ordinaire donne des cristaux, et Hall se souvenait aussi qu'il avait vu récemment dans une verrerie locale une masse pierreuse obtenue en refroidissant lentement du verre à bouteille ordinaire fondu. Il pensa donc que son entreprise pouvait réussir. Il se servit de huit trapps et sept laves différents, dont certains provenaient du Vésuve et de Sicile. Chaque échantillon était d'abord chauffé dans un four à réverbère ou un four de fonderie jusqu'à fusion complète, puis converti en verre par refroidissement rapide. Des fragments de ce verre furent chauffés de nouveau jusqu'à fusion et la masse fondue maintenue pendant un certain temps à une température moindre dans un feu ouvert ou dans un four-moufle avant la congélation. Hall remarqua bientôt qu'en réglant le taux de refroidissement il pouvait produire une masse pierreuse plus ou moins cristalline. Empiriquement il trouva la durée de chauffage au four-moufle: pour une expérience il mentionne un temps de douze heures. La conversion préalable de la roche en verre était une précaution destinée à écarter l'objection éventuelle que les échantillons n'avaient pas été chauffés suffisamment pour en détruire la texture cristalline (figures 3 et 4).

Il est certain qu'on a pu établir l'existence de cristaux dans le produit final de toutes ces expériences. Parfois il ne s'agissait que de germes de cristallisation; dans d'autres, Hall avait obtenu des roches qui, à première vue, pouvaient ressembler aux roches primitives. Il ne disposait que d'une lentille de poche pour les examiner et l'on n'avait pas encore mis au point la technique des sections de roches minces. Heureusement le *Geological Museum* de Londres possède quelques-uns de ces échantillons. On les a examinés au microscope; dans une coulée on a pu reconnaître des cristaux de minéraux caractéristiques des roches fondues: feldspath, pyroxène, olivine et minerai de fer. Dans d'autres cas, bien que des cristallites ou centres de cristallisation sphérolithiques aient pris naissance, la matrice vitreuse n'avait pas disparu. Il semble que Hall n'ait pas réussi à produire exactement la texture cristalline de la roche de départ (figures 9–11). Cela n'est guère surprenant, car le temps assigné avait été beaucoup plus court que la durée réelle nécessaire pour le refroidissement des roches ignées naturelles ou des laves.

Hall contrôlait soigneusement la température de ses expériences au moyen de «tubes thermométriques» ou pyromètres, conçus par Josiah Wedgwood l'aîné, pour mesurer des températures dépassant les limites des thermomètres connus. Malheureusement il est impossible de ramener à l'échelle thermométrique ordinaire les indications des pyromètres en question; l'on sait tout au plus que les roches avaient été portées à une température supérieure au point de fusion de l'argent, soit 950° environ.

Sans doute les travaux de Hall sur les trapps et les laves étaient-ils intéressants et fructueux, mais il était plus important de déterminer la façon dont la compression modifie l'action de la chaleur [5]. Il le fit en soumettant le carbonate de calcium à des températures et pressions élevées pour démontrer que dans ces conditions le carbonate ne se dissocie pas en chaux vive et en anhydride carbonique. Il espérait obtenir du marbre cristallin et même fondre le carbonate de chaux. De 1798 à 1805 il effectua plus de 500 expériences. En procédant par tâtonnements son adresse s'accrut, et finalement ses efforts furent récompensés. Il a décrit en détail ses méthodes et ses résultats; nous ne pouvons en donner qu'un bref aperçu.

Hall essaya divers types de carbonate de calcium; généralement il employait la craie pulvérisée, ou parfois du calcaire ordinaire, du marbre et du carbonate de calcium chimiquement pur. Hall se rendit compte que le carbonate de chaux naturel est rarement pur. Pour chaque expérience il utilisait de 0,5 à 5 grammes de matière.

Au début il avait effectué ses expériences dans un récipient muni d'un couvercle vissé, mais bientôt il simplifia les choses en employant des tubes en fer étroits fermés aux deux bouts; c'étaient, en fait, des canons de fusils. Le carbonate enveloppé de papier reposait dans la culasse scellée au moyen d'un bouchon en fer soudé; le reste du tube était rempli d'argile cuite et broyée. L'autre extrémité, la bouche, était soudée de façon analogue. La culasse était placée dans un four-moufle tandis que la bouche était refroidie avec des chiffons mouillés (figure 6). Un des

premiers résultats obtenus fut l'explosion du four, mais Hall n'en fut pas découragé. Il modifiait son appareil constamment: non satisfait des résultats obtenus avec des tubes bourrés d'argile, il remplaça cette dernière par un métal fusible qu'il pourrait retirer aisément par fusion à la température de l'ébullition de l'eau, après l'expérience. Il s'aperçut alors qu'une nouvelle difficulté surgissait; en effet, le métal fondait parfois, traversait le fer par diffusion et sortait du canon par extrusion sous forme d'un fil fin. Hall attribua ce phénomène à la pression créée par l'expansion du métal fondu. Pour y remédier il introduisit avec le carbonate un petit tube contenant de l'air et ouvert d'un côté, l'air devant servir de tampon pour l'expansion du métal. Il finit par trouver, après avoir détruit force canons de fusils la quantité d'air à utiliser. Il put empêcher la contamination du carbonate en le plaçant dans de petites fioles tubulaires d'un diamètre d'environ 6 mm. Comme le verre était trop fusible il le remplaça par de la porcelaine. Les fioles étaient fixées à l'extrémité de baguettes reposant dans un châssis en fer facile à déplacer après l'essai (figure 6). Parfois il prit du plomb au lieu de métal fusible, ou encore, il y ajouta du silex ou du quartz broyé pour éviter le contact direct entre le carbonate et le métal fusible. Il modifia sensiblement son mode opératoire lorsqu'il remplaça ses canons de fusils par des tubes de porcelaine fabriqués à l'usine à de Wedgwood Etruria (figures 2 et 13); ces tubes avaient une longueur d'environ 34,5 cm, un diamètre de 6 mm et une épaisseur de 5 mm. Hall se servit aussi de silex comme bourrage, et pour assurer l'étanchéité des tubes il en scella l'extrémité ouverte au moyen de borax fondu, mais les résultats ne furent pas satisfaisants. Hall se doutait bien que les tubes étaient poreux et dans une certaine mesure il parvint à les imperméabiliser intérieurement en y coulant du borax fondu. Plus tard, comme les tubes de Wedgwood ne lui convenaient plus, il en fabriqua lui-même, à partir d'un mélange de kaolin et de pierre de Cornouailles (peut-être de terre à porcelaine). Il constata qu'il était plus avantageux de placer les tubes verticalement dans le four quand le borax servait à la fermeture (figure 2), car l'augmentation de l'étanchéité permettait d'atteindre des pressions plus élevées.

En 1803 Hall effectua 156 expériences donnant des résultats variables; dans certains cas la perte d'anhydride carbonique avait été été très minime, de 2 à 3% et même moins. Il conclut à juste titre que le carbonate de calcium chauffé sous pression ne se dissocie pas sensiblement même au-delà de 1 000°. Il est probable qu'il ait réussi à transformer la craie pulvérisée en une substance très semblable au marbre cristallin (figure 12). Dans un essai à partir de 80 grains (environ 5 g) de craie pulvérisée, il obtint une masse compacte semi-transparente présentant le clivage rhomboïdal caractéristique de la calcite. La perte en poids ne s'était élevée qu'à 3,5 grains, soit moins de 5%.

Hall espérait toujours pouvoir fondre le carbonate de calcium et à cet effet il décida d'augmenter tant la pression que la température. Il estimait que les tubes de porcelaine ne pouvaient convenir, et il revint aux canons de fusils, mais ceux-là non plus ne faisaient pas l'affaire. Il choisit finalement des barres de fer et y fora des ouvertures pour soutenir les fioles de porcelaine (figures 5, 7). Il put se procurer en Russie des barres de fer de la marque *Old Sable* de qualité exceptionnelle. Son ami le Dr Robert Kennedy, un chimiste averti, lui suggéra d'ajouter au carbonate de calcium une petite quantité d'eau dont la vaporisation produirait une augmentation notable de la pression. Hall adopta d'emblée cette idée. Il essaya également de faire mieux en ajoutant, au lieu d'eau, du carbonate d'ammonium, de la poudre à canon, du papier imprégné de salpêtre, etc., mais il vit que l'eau seule était préférable à ces ingrédients, car ils provoquaient des réactions indésirables entre le carbonate et l'argile en donnant au moins un minéral supplémentaire soit par fusion soit par dépôt après sublimation.

En 1804 Hall annonça publiquement qu'il avait réussi à fondre le carbonate; toutefois ses critiques ayant suggéré que la fusion provenait peut-être de la présence d'impuretés, Hall entreprit de l'effectuer dans un récipient en platine. Comme il ne pouvait obtenir que des feuilles minces il en façonna des gobelets en les pliant comme du papier filtre. Il se procura également du carbonate de calcium chimiquement pur spécialement préparé à cet effet.

Tout comme dans ses expériences précédentes sur le trapp, Hall nota soigneusement les températures atteintes. Il employait des pyromètres inventés par Wedgwood. Bien qu'il soit difficile de savoir exactement la température atteinte, Hall avait heureusement indiqué que la graduation 22 de son échelle correspondait au point de fusion de l'argent, ce qui permet de deviner à peu près les températures qu'il avait obtenues: on pense qu'elles se situaient souvent bien au-delà de 1 000°.

Hall ne se contenta pas de noter la température des essais, il fabriqua un dispositif pour mesurer la pression développée. Le principe en était basé sur le système utilisé par le Comte Rumford pour déterminer la force explosive de la poudre à canon. Grâce à cet appareil (figure 8) qui paraît rudimentaire à nos yeux, Hall pouvait lire approximativement des pressions allant à 270 atmosphères, en calculant la pression au cours d'une expérience, à partir du poids soulevé par l'expansion des gaz dégagés dans ses tubes à compression. Certes, en général, la pression obtenue n'arrivait pas si haut: il calcula qu'elle correspondait à la hauteur d'une colonne d'eau de mer de 2 710 m. Visiblement il cherchait à connaître la pression exercée sur des roches ensevelies très profondément au fond de la mer ou sous une épaisse couche de roches.

Hall atteignit presque tous ces objectifs. Il démontra certainement qu'à haute pression la dissociation thermique de carbonate de calcium n'a pas lieu. Sous l'angle de la géologie c'est là le plus important de ses réalisations. Il semble aussi avoir réussi à transformer la poudre de chaux ou de calcaire en une substance très semblable au marbre cristallin naturel, donnant une explication partielle du mode de formation de certains marbres naturels. On peut se demander en vérité s'il est réellement arrivé à fondre le carbonate de calcium, car cela ne ressort pas de la description de ses essais. En effet, il ne mentionne pas qu'il ait soumis le produit fondu à une réaction quelconque (par exemple l'effervescence provoquée par un acide) permettant d'identifier ce produit. A vrai dire, même avec les ressources d'un laboratoire moderne, il n'est pas facile de fondre le carbonate de calcium. On ne possède aucun document incontesté prouvant que cette fusion ait eu lieu avant l'année 1912, date où elle fut exécutée par H. E. Boeke à une température de 1 289° et une pression de 110 atmosphères [6]. Il n'est pas impossible que Hall ait trouvé les conditions requises, mais nous n'en serons jamais sûrs. Quoi qu'il en soit, Hall a indubitablement accompli une prouesse très remarquable pour un savant amateur du dix-huitième siècle et la valeur de sa contribution à la géologie est durable. Il mérite également d'être considéré comme un des pionniers les plus illustres de la chimie physique.

A l'époque ses travaux ont eu un grand retentissement tant en Grande-Bretagne qu'à l'étranger, et il a souvent été cité depuis. L'édition française de ses expériences sur la compression fut publiée à Genève en 1807. Dans sa préface, le traducteur, l'éminent savant suisse Marc-Auguste Pictet compare élogieusement Hall à Lavoisier [7]. Quand il eut achevé les expériences décrites ci-dessus, Hall continua à étudier la géologie et publia plusieurs mémoires géologiques dignes d'intérêt. Il convient de rappeler également que son œuvre prouve que comme géologue il était tout aussi habile sur le terrain qu'au laboratoire. Elu membre de la *Royal Society* de Londres en 1806, il fut le deuxième Président de la *Royal Society* d'Edimbourg de 1812 en 1820. Après quelques années de maladie, il mourut le 23 juin 1832 à Edimbourg.

REMERCIEMENTS

L'auteur tient à remercier le Directeur du *Geological Survey and Museum* de Londres d'avoir eu l'amabilité de l'autoriser à reproduire les illustrations de Hall appartenant au Musée, et le *Council of the Royal Society* d'Edimbourg qui l'a autorisé à reproduire le portrait de Hall et les autres illustrations tirées des comptes rendus de ses expériences publiés dans les Vols. V et VI des «Transactions» de la Société.

BIBLIOGRAPHIE

[1] MacGregor, M. *Endeavour*, **6**, 109, 1947.
[2] McKie, D. *Notes roy. Soc. Lond.*, **7**, 13, 1949.
[3] Hall, Sir James. *Trans. roy. Soc. Edinb.*, **5**, 43, 1805.
[4] Keir, J. *Phil. Trans.*, **66**, 530, 1776.
[5] Hall, Sir James. *Trans. roy. Soc. Edinb.*, **6**, 71, 1812.
[6] Clarke, F. W. *Bull.* 770 *U.S. geol. Surv.* (5e édition), 563, 1924.
[7] Pictet, M. A. «Description d'une suite d'expériences qui montrent comment la compression peut modifier l'action de la chaleur», p. IX. Genève. 1807.

Formations observées à la surface des tourbières boréales

par H. SJÖRS

Les tourbières boréales, c'est-à-dire les marais et marécages que l'on rencontre au Nord dans la région circumpolaire et dont les sols drainés sont surtout recouverts de forêts de résineux, présentent des formations très originales. L'origine de ces formations n'est pas encore très clairement connue et ne le sera qu'après des études détaillées. Cet article décrit — avec présentation de vues — l'état actuel des recherches.

On sait depuis longtemps que les marécages et marais septentrionaux présentent des formations bien dessinées dans lesquelles des zones sèches alternent avec des zones molles et imprégnées d'eau. L'origine de ces formations remarquables n'est cependant pas encore entièrement élucidée. Il y a de nombreuses raisons à cela. Comme Linné le rappelle avec force [1], il n'est pas toujours très facile de parcourir ces régions à pied; en outre, les différences linguistiques ont longtemps gêné la confrontation des divers ouvrages. Cependant, nous jugeons le moment venu de faire le point des connaissances acquises à ce jour, car, non seulement on peut actuellement se rendre plus aisément dans ces régions, mais, en outre, les observations et vues aériennes ont vivement stimulé les recherches.

LA ZONE BORÉALE

On définit la zone boréale comme étant la zone septentrionale presque circumpolaire, dont les sols drainés sont recouverts de forêts à conifères presque exclusivement [2]. Bien que les formations, objet de cet article, ne se localisent pas uniquement dans cette zone, elles y sont beaucoup plus fréquentes qu'ailleurs. La forêt boréale souvent appelée Taïga, s'étend de Trondheim à la mer d'Okhotsk et de l'Alaska à Terre-Neuve (figure 13). Ne sont incluses dans cette définition ni les forêts océaniques de résineux — tels les pins d'Ecosse et des parties les plus occidentales de la Norvège et les forêts du Pacifique — ni les forêts variées de conifères non-boréaux. On pourrait subdiviser la région boréale en suivant la répartition des arbres et des autres espèces forestières, mais une classification par zones est d'une plus grande valeur écologique et générale. Si l'on excepte la partie méridionale qui sert de transition, soit à des steppes, soit à des forêts de feuillus, la zone boréale peut être normalement subdivisée en deux secteurs principaux: la région boréale et la région subarctique. A son tour, la première a été divisée — par exemple par les Russes — en Taïga centrale et Taïga méridionale [3]. La région subarctique (Taïga septentrionale) est séparée de l'arctique sans arbres par une bande généralement étroite de toundra boisée. La formation de zones dues à des différences d'altitude dans les parties montagneuses de la région boréale trouve un parallèle dans la formation de zones de latitude. Cependant, la présence d'un nombre plus ou moins grand de bouleaux subalpins particulièrement en Laponie et au Kamtchatka complique quelque peu ces recoupements.

Ces différentes zones sont en relation étroite avec la longueur de la saison printanière et avec le froid hivernal. Sur toute l'étendue de la région boréale, les températures hivernales sont inférieures à 0° et le gel saisonnier du sol est général. D'autre part, on ne trouve de couches persistantes de sol gelé (*tjäles*) que dans les parties les plus continentales des régions boréales, où les températures hivernales sont extrêmement basses. Certaines des structures et formations observées dans les tourbières sont évidemment étroitement liées à la façon dont le sol est gelé, mais d'autres semblent indépendantes de ce phénomène. Les formations existant dans les zones à tjäles doivent être étudiées séparément.

La répartition de ces couches permanentes ne semble pas influer de façon déterminante sur celle de la végétation [4]. Ainsi, en Europe et au Labrador, on rencontre des tjäles discontinus dans la ceinture subarctique, alors que dans certaines régions du Canada et de la Sibérie occidentale, ils descendent jusqu'au niveau de la ceinture boréale, tout en restant en majeure partie dans la ceinture subarctique; dans les

FIGURE 1 – *Tourbière minérotrophique (marécage). Petites îles couvertes d'épaisses épinettes noires* (Picea mariana). *Toutes les vues de cette page proviennent des basses-terres de la Baie d'Hudson dans l'Ontario septentrional.*

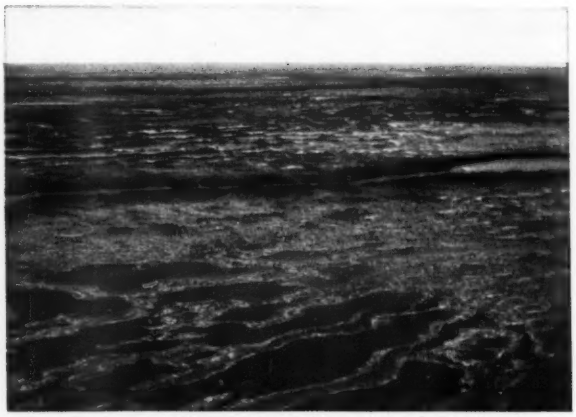


FIGURE 2 – *Tourbière ombrotrophique (marais surélevés) avec des fosses vastes et nombreuses. Un ruisseau court entre deux marais (traversant l'image) et se jette dans un étang à castors (à droite).*

FIGURE 3 – *Partie gauche ombrotrophique; coloration due surtout à* Sphagnum rubellum. *Partie droite minérotrophique avec des formations normales à la pente, couleur grise due partiellement à des mélèzes nains. Au centre, îles à épinette noire.*

FIGURE 4 – *Iles à épinette noire, vastes, circulaires, de forme partiellement annulaire dans un cirque de tourbière minérotrophique abondamment recouverte de petits mélèzes* (Larix laricina).

FIGURE 5 – *Vastes flarks encore couverts d'eau de fonte et séparés les uns des autres par des buttes élevées garnies partiellement d'épinette noire. Cet ensemble rappelle une rizière.*

FIGURE 6 – *Lac formé probablement par la coalescence de plusieurs fosses. Ce type de formation se rencontre dans les zones presque plates qui constituent des lignes de partage entre plusieurs rivières.*

FIGURE 7 – *Tourbière ombrotrophique avec fondrières. Pins noirs d'Ecosse; espèces dominantes:* Calluna, Betula nana *et* Eriophorum vaginatum; *au bord de l'eau* Scheuchzeria palustris *et* Carex limosa. *Tisjökölen, hautes-terres de la Suède Centrale.*

FIGURE 8 – *Tourbière ombrotrophique avec digues élevées et quelques fosses. Entre les digues on trouve surtout* Trichophorum caespitosum. *Premier plan sableux avec lichens* Cladonia *et pins. Près de Lofsdalen, hautes-terres de la Suède centrale.*

FIGURE 9 – *Zone en pente, assez fortement imbibée par de l'eau modérément minérotrophique.* Molinia coerulea *au premier plan. Sävsnäs, partie méridionale des hautes-terres de la Suède Centrale.*

FIGURE 10 – *Deux flarks séparés par un tapis ferme mais peu élevé de* Carex *et de* Molinia. *Dans les flarks,* Carex rostrata, C. livida *et* Rhynchospora alba. *Pied de la zone inclinée figurant sur la figure* 9.

FIGURE 11 – *Un palsa haut de* 3 *mètres dans la partie subarctique des basses-terres de la Baie d'Hudson. Epinette noire usée par le vent; tapis de lichens (surtout* Cetraria nivalis) *preuve de l'absence de couverture neigeuse.*

FIGURE 12 – *Le vent et la pluie érodent certains palsas, puis le noyau glacé commence à fondre. La fosse est probablement l'emplacement d'un palsa totalement disparu. Même zone que sur la figure* 11.

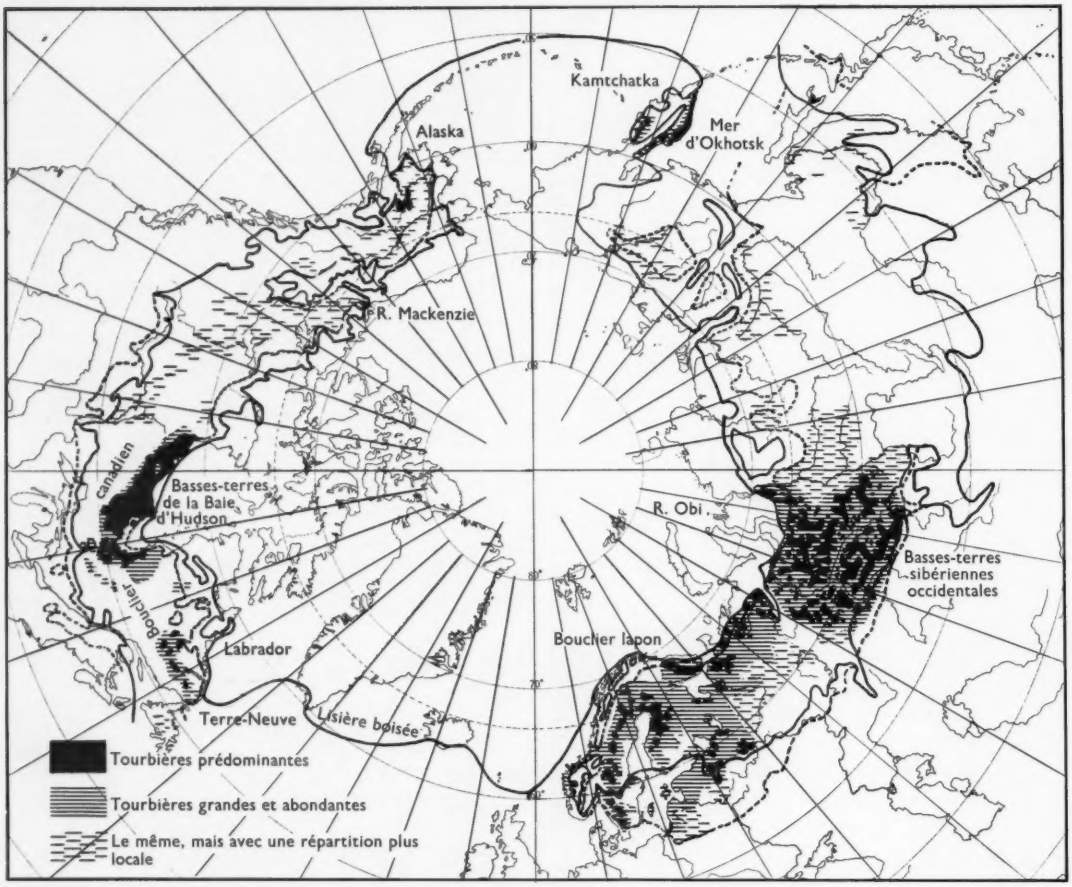


FIGURE 13 – *Zone de tourbière abondante dans la ceinture boréale. Au Sud ou au-dessous se trouve la lisière boisée, faite de toundra boisée ou de terres subalpines s'étendant jusqu'à la ligne septentrionale discontinue. Au sud de la zone boréale, des régions de transition s'étendent jusqu'aux lignes discontinues du sud.*

zones les plus continentales, ces sols gelés forment des ensembles continus, légèrement au sud de la lisière forestière. En Sibérie centrale et orientale, on rencontre de puissants tjäles dans toute la ceinture boréale, dont ils débordent la limite méridionale.

Comme d'autres zones biotiques, la ceinture boréale est loin de présenter une végétation uniforme et si les forêts boréales, dont certaines croissent sur la tourbe, ne montrent pas la diversité des forêts plus méridionales, leur stade de développement, le climat, les relations sol-eau, l'homme, les ont diversifiées à l'extrême. A côté des forêts, le voyageur qui traverse ces régions à pied, perçoit difficilement l'abondance réelle des marécages qui constituent la majeure partie des zones non boisées.

L'IMPORTANCE DES TOURBIÈRES DANS LE MONDE

Si la ceinture boréale renferme la majeure partie des tourbières du globe, son relief détruit l'uniformité de leur répartition. Au sud de la Baie d'Hudson, et à l'exception uniquement des lacs et des lits de rivières, une tourbe humide [5] recouvre entièrement les basses-terres de superficie voisine de celle de la Grande-Bretagne. Si des dépôts moins importants existent dans d'autres parties de l'Amérique boréale, l'Alaska [6] et le Labrador [7] possèdent eux aussi des tourbières de grande étendue.

La distribution des tourbières en Russie est inégale [8]; ainsi, la partie de la Sibérie Occidentale entourant l'Obi et l'Irtych est, à l'exception des lits des rivières et de leurs affluents,

entièrement tapissée de tourbières constituant la plus grande zone tourbeuse du monde. De même, ces formations sont très denses au Kamtchatka et au nord de la Russie d'Europe.

Elles s'étendent sur un tiers de la Finlande [9], ce qui est le plus fort pourcentage enregistré dans un pays; dans certains districts, ce pourcentage atteint 60 à 70%. En Suède, 20% de la ceinture boréale supportent de la tourbe et quelques zones sont tourbeuses à 50%. Les tourbières de la Suède ou de la Finlande sont rarement très étendues, par suite de l'absence de vastes plaines; ainsi, en Laponie, la plus vaste de ces formations, la Sjaunja, couvre environ 400 km^2.

Le type des tourbières, de même que celui des sites dépend autant de la topographie que du climat. L'importance du climat a certainement été surestimée à ce jour, car des types très différents de formation se rencontrent dans la zone boréale, comme d'ailleurs dans des zones de climat pratiquement identiques.

NUTRITION DE LA VÉGÉTATION DES TOURBIÈRES

Il existe deux sources d'aliments minéraux: l'atmosphère et le sol. Si la première profite évidemment à l'ensemble des tourbières par ses précipitations et ses poussières, la deuxième peut faire entièrement défaut à certaines d'entre elles. Si tel est le cas, la zone est dite ombrotrophique [10], c'est-à-dire, alimentée par la pluie; au contraire, s'il existe des apports de matériaux nutritifs par le sol, les sites sont dits minérotrophiques, ce terme indiquant que les nutriments sont apportés à la tourbe par de l'eau qui les a auparavant extraits du sol.

Dans les régions océaniques, telles que l'Ouest de la Grande-Bretagne ou de l'Irlande, l'alimentation ombrotrophique n'est que légèrement inférieure à une alimentation minérotrophique maigre; il n'en résulte donc que de faibles différences de végétation. La ceinture boréale est, elle, surtout subcontinentale ou continentale et les apports dus aux pluies et aux poussières, particulièrement en sels marins, sont beaucoup moins importants, et les différences entre tourbières ombrotrophiques et minérotrophiques tendent à s'accentuer.

D'autre part, les sols boréaux sont si maigres et le ruissellement si intense qu'une grande partie des eaux terrestres ne rencontrent que des sols lessivés et très pauvres ou sont diluées par des quantités importantes d'eau presque exclusivement ombrotrophique. Il en résulte que le caractère minérotrophique de nombreuses tourbières boréales est peu marqué et même douteux. Ceci est particulièrement vrai dans les régions qui s'étendent sur deux boucliers de roches dures archéennes ou précambriennes, au Canada et en Laponie.

D'autres points ont une alimentation minérotrophique plus riche: si des fragments calcaires existent dans le sol, les sites minérotrophiques voient leur concentration en calcium accrue (les autres nutriments restant souvent inchangés) et des tourbières calcaires, alcalines ou, tout au moins, presque neutres sont formées. Ailleurs, la presque totalité des tourbières minérotrophiques sont plus ou moins acides, certaines presque autant que les formations ombrotrophiques.

Cependant, l'acidité n'est pas une simple fonction de l'approvisionnement minéral; parmi d'autres facteurs influant sur le pH, la vitesse de la formation de la tourbe semble être importante: dans les sites imprégnés d'eau, une vitesse faible aboutit à la formation d'une tourbe plus alcaline.

La vitesse de croissance des végétaux et la production organique due à la photosynthèse sont plus lentes dans le Nord, à cause de la brève saison printanière; en outre, la vitesse de décomposition de la tourbe dans les terrains imprégnés d'eau y semble plus grande. La solubilité croissante de l'oxygène dans l'eau à basses températures doit avoir une certaine importance, mais c'est la croissance active des algues dans ces terrains détrempés qui est probablement le principal facteur. Les algues, en effet, concurrencent fortement les sphaignes et produisent également beaucoup d'oxygène par photosynthèse, de telle sorte que les matériaux organiques formés se décomposent facilement et qu'aucune nouvelle tourbe ne s'accumule. En outre, les restes de tourbe et d'autres plantes sont soumis à un type d'oxydation superficielle humide, très actif, qui s'ajoute à la décomposition normale. Il a été montré que dans certaines régions détrempées, appelées «creux» et *flarks*, des hautes terres de la Suède Centrale, il n'y avait pas eu de formation de tourbe depuis 2 000 à 3 000 ans.

PRINCIPALES FAMILLES DE PLANTES

De nombreuses publications écologiques ont été éditées traitant de la composition botanique des tourbières boréales [9, 10, 12]. Seules quelques rares espèces sont capables de se développer dans des conditions strictement ombrotrophiques, espèces qui se trouvent également dans les terrains

minérotrophiques; en fait, la plus grande partie des plantes poussant en zone boréale se confinent aux sites minérotrophiques. Même dans les endroits les plus acides et les plus faiblement minérotrophiques, la flore est considérablement plus riche que dans les communautés ombrotrophiques et comporte de nombreuses espèces de laiches (*Carex*), de lin des marais (*Eriophorum*), de sphaignes (*Sphagnum*) et de trèfle d'eau (*Menyanthes trifoliata*), plusieurs espèces de saules (*Salix*) et d'autres espèces. Les tourbières presque neutres et surtout les tourbières alcalines et calcaires portent des plantes si nombreuses qu'elles ont été appelées «les riches marécages» [10].

Cette différence entre végétations ombrotrophiques et minérotrophiques se traduit par des nuances dans la couleur de la tourbière et on peut parfois distinguer chaque partie sur des vues aériennes en couleurs (figure 3). Sur des vues en blanc et noir, le ton seul ne permet pas l'identification, mais l'hydrographie des formations est tellement nette qu'on peut presque distinguer les deux types de végétation. Les différences géographiques et climatiques, les degrés de dureté et d'humidité du sol peuvent également amener d'autres variations [6, 7, 9, 12] dans la zone boréale.

La tourbière boréale typique est constituée de surfaces extrêmement humides et boueuses à riche végétation d'algues, mais à macrovégétation clairsemée. Elle est généralement très étendue, mais presque toujours nettement délimitée et couverte d'une façon régulière d'eau peu profonde à l'époque de la fonte des neiges et aussi pendant les autres périodes humides. Elle constitue la formation la plus originale et semble être stable et persistante, comme le montrent les résultats de stratigraphie pollinique [11]. Il est rare qu'une belle végétation, génératrice de tourbe, recouvre ces formations; d'ailleurs, l'absence de repeuplement et de formation de nouvelles tourbières peut s'expliquer par la croissance active des algues et l'oxydation superficielle très corrosive que nous avons déjà citée.

Ces formations tourbeuses boréales sont de deux types: celles où il existe des tjäles et celles où il n'y en a pas. Ces groupes peuvent être étudiés séparément.

FORMATIONS OBSERVÉES DANS LES ZONES SANS TJÄLES

Dans les marécages ombrotrophiques, d'anciennes fondrières deviennent de plus en plus profondes, par suite de l'épaisseur croissante de la tourbe environnante; finalement, ces trous deviennent des flaques marécageuses [11, 13] profondes de 60 cm à plus de 3 m. On en rencontre en grand nombre dans les marais boréaux, notamment en Suède [11, 13] (figures 7 et 8), dans la Province de Québec et dans le Nord de la Province de l'Ontario [5] (figure 2). On trouve des étangs semblables en dehors des marécages boréaux et récemment on a décrit des exemples remarquables de formations analogues dans le S.-O. de l'Ecosse [14], dans la région de Silver Flowe; on trouve également en Minnesota septentrional des formations tourbeuses bien dessinées [15]. A l'intérieur même de la ceinture boréale, la tourbière minérotrophique est la formation la plus étendue et la plus remarquable, par suite des écoulements assez abondants en surface et au voisinage de la surface.

Ces grandes formations boréales se distinguent par des étangs que l'on désigne par le suédois *flark* ou le finnois *rimpi* (figures 5, 10). Le terme franco-canadien «mare» a également été proposé [16]. Un flark typique est une zone limitée, humide, boueuse, de forme habituellement allongée et difficilement accessible à pied, car le réseau des racines a souvent des mailles trop grossières pour pouvoir supporter le poids de l'explorateur. Chaque flark est rigoureusement horizontal, même s'il s'étend sur plusieurs centaines de mètres; sur les pentes, ils n'ont que quelques mètres, mais dans les tourbières presque plates, ils peuvent avoir plus de cent mètres de large.

La végétation est remarquablement uniforme dans toute la ceinture boréale, car les principales espèces sont circumboréales: on y trouve de nombreuses espèces de *Carex*, tels que *C. limosa*, *C. chordorrhiza*, et *C. livida*, *Eriophorum angustifolium*, *E. gracile*, *Menyanthes trifoliata*, *Scheuchzeria palustris*, *Equisetum fluviatile*, *Juncus stygius* et quelques autres espèces. On n'explique pas de façon satisfaisante pour quelle raison toutes ces plantes qui se propagent par rhizomes rampants, croissent si chichement sur les flarks. Les nutriments sont rares, il est vrai, mais pas plus que dans d'autres parties de la tourbière où la végétation est dense. Toutes ces plantes sont bien pourvues de tissus respiratoires et ne souffrent pas du manque d'oxygène au niveau de la racine.

Le grand axe des flarks est toujours normal à la pente; ceci est vrai pour toutes les formations indépendantes de la présence de tjäles et de l'existence de vents violents. Sur une pente même faible, les flarks successifs forment comme les marches d'un escalier. Certains grands groupes ressemblent étonnamment à des rizières en terrasse

(figure 5). Ajoutons que ces formations sont étroitement localisées au voisinage de la ligne d'écoulement des eaux. Toutes ces remarques indiquent que les flarks sont intimement liés au mouvement de l'eau à travers la tourbière, et cela exclut toute autre explication ne s'appuyant pas sur les mêmes considérations d'orientation et de situation. Cependant, si les flarks sont en relation directe avec l'hydrographie, celle-ci n'en est pas la cause — ni d'ailleurs le glissement du sol — sinon on les trouverait surtout sur les pentes raides et non sur les surfaces presque planes. Il n'en est rien et, au contraire, les flarks les plus remarquables se rencontrent sur des pentes trop faibles pour permettre un écoulement si minime soit-il des tourbières (figures 5, 10), et les pentes les plus abruptes en sont dépourvues (figure 9).

On constate [11] que la tourbe se développe un peu mieux entre les flarks qu'en leur milieu; ceci est nécessaire à la stabilité du système qui semble précaire. L'érosion ne doit pas attaquer les digues de retenue; en fait, l'érosion naturelle est inhabituelle et ne s'observe que sur des pentes exceptionnellement abruptes, cas où la formation est détruite entièrement.

Dans les parties subarctiques de la zone boréale, les flarks deviennent très grands, les digues qui les séparent les uns des autres prennent souvent — pas toujours — la forme de buttes nettement marquées de 60 cm à 1 m de haut, couvertes de lichen, d'arbustes rabougris et parfois de petits arbres. Cette élévation peut s'expliquer par la pression exercée horizontalement par la glace, durant la période de gel, au début de l'hiver [17]. Des phénomènes analogues s'observent dans les lacs pris par la glace: les pierres et la terre entassées forment une crête basse autour du bassin. Cette expansion de la glace est provoquée par les changements de température: lorsque la glace se rétracte durant les grands froids, de nombreuses fissures et crevasses se forment et s'emplissent d'eau qui gèle presque instantanément. Quand la température croît de nouveau, la glace se gonfle et exerce une forte pression sur les bords du bassin: c'est ainsi que les buttes non encore glacées qui séparent les flarks sont surélevées. Les retenues prennent en glace plus tardivement que les flarks et restent gelés plus longtemps au printemps.

Si cette pression des glaces provoque l'exhaussement des digues, elle ne semble pas expliquer à elle seule la création des flarks ni celle des formations étudiées considérées dans leur ensemble, car les flarks sont souvent séparés par des digues basses.

TYPE DE FORMATIONS EXISTANT DANS LES SURFACES À TJÄLES

Les premières formations de tjäles que l'on aperçoit dans une tourbière sont situées sur des tertres secs qui, sous l'action des couches gelées, s'élèvent progressivement. On connaît, sous le nom d'îles à sapins et de *palsas*, plusieurs types de monticules glacés et élevés.

Ces îles à sapins se rencontrent en Alaska et à l'intérieur du Canada (figure 1). A la bordure méridionale des régions où les tjäles deviennent discontinus et où le climat est encore favorable à la croissance des arbres, ces îles sont souvent fort étendues, quoique modérément hautes, et couvertes de peuplements exceptionnellement denses d'épinette noire (*Picea mariana*) (figure 4). Cette espèce est bien adaptée à la croissance sur les mamelons glacés de tourbe; son enracinement demande peu de sol et les besoins en nutriments sont minimes; elle supporte une acidité élevée et se reproduit avec profusion par marcottage, c'est-à-dire que des racines aériennes se mêlent à la végétation de mousse et de lichen.

Plus au Nord, les tertres glacés ne supportent que quelques arbrisseaux rares (épinette noire et *Larix laricina* au Canada). En hiver, le vent qui balaie la neige les laisse nus et exposés à l'air glacé. Des îlots analogues, sans aucun arbre, s'observent dans les parties les plus septentrionales de la Russie et de la Laponie [9, 18]: ce sont les *palsas* (figure 11). Ils ne sont pas très hauts, mais peuvent atteindre près de 8 m en Suède et en Finlande et davantage en Russie. Entre les palsas, le gel est saisonnier et le sol très humide en été.

L'intérieur des palsas est constitué de couches successives de tourbe glacée et de glace pure [18] qui proviendrait de l'accumulation de l'eau sur les cristaux en voie de croissance. Cette eau qui vient des profondeurs ou du voisinage accroît la masse du palsa. Souvent l'érosion attaque celui-ci et il finit par disparaître complètement; il est alors remplacé par un creux rempli d'eau (figure 12).

Lorsque le tjäle forme des masses continues, les palsas disparaissent au profit de plateaux tourbeux moins remarquables, mais élevés et très étendus, qui se présentent sous forme de polygones glacés ou sous d'autres formes, très différentes des formations observées dans les tourbières boréales sans tjäles. On remarque parfois des monticules de glace et de tourbe gelée si de l'eau liquide existe. Ces *pingos* sont très imposants au voisinage de l'Arctique; les célèbres pingos du delta de la

rivière Mackenzie [19] atteignent les dimensions de l'*Albert Hall* de Londres.

CONSIDÉRATIONS HISTORIQUES SUR LE DÉVELOPPEMENT DES TOURBIÈRES

Seule une petite fraction des tourbières boréales provient de lacs emplis de végétation; il est cependant probable qu'ils ont servi de points de départ à l'extension des tourbières sur les sols minéraux. D'autres centres plus anciens furent le résultat de l'activité des castors, autrefois très nombreux dans ces régions. Les digues qu'ils construisent provoquent des infiltrations sur les berges des cours d'eau et des petites rivières, infiltrations qui détruisent les arbres forestiers et donnent naissance à une végétation formatrice de tourbe.

La tourbe boréale repose directement sur un sol minéral qui jadis porta des forêts ou, au moins, une brousse ou des bois marécageux. En réalité, il ne semble pas qu'au début de la période post-glaciaire, de nombreuses tourbières aient recouvert la zone boréale, sauf peut-être dans les régions non gelées. Compte tenu de l'origine récente des tourbières boréales et de leur peuplement végétal (en particulier des espèces acidophiles), on peut s'étonner de leur uniformité dans des zones très éloignées les unes des autres. Il est probable que toutes ces espèces sont très anciennes, mais que leur combinaison en colonies végétales doit être récente, du moins en ce qui concerne l'actuelle zone boréale. Les tourbières boréales se sont étendues rapidement au milieu de la période post-glaciaire, puis ce processus se ralentit et les risques de déboisement par inondation sont aujourd'hui très faibles en Laponie [20].

La plupart des formations qui de nos jours caractérisent les tourbières semblent avoir manqué durant les premiers stades de leur développement et ont probablement pris naissance durant les derniers millénaires. Le datage pollinique [11] indique que ces formations ont environ 2 000 à 3 000 ans dans les hautes-terres de la Suède Centrale et des chiffres analogues ont été trouvés pour les palsas subalpins [18] des parties les plus septentrionales de la Suède; des données plus précises sont maintenant obtenues par datage au ^{14}C.

L'évolution de ces formations est plus complexe que celle qui se produit normalement dans un habitat humide et qui est décrite dans les manuels écologiques. Il est évident que la tendance inverse l'emporte et qu'on voit beaucoup plus fréquemment le développement se faire à partir du sol minéral et le site devenir graduellement plus humide avec certaines parties évoluant en flarks ou même en fosses secondaires. En fait, une évolution ultérieure semble parfois survenir lorsque des fosses adjacentes s'étendent et se rejoignent pour former des lacs comme en certains endroits des basses-terres de la Baie d'Hudson (figure 6). Les terrains à tjäles eux aussi, présentent à la fois des dégradations et édifications.

BIBLIOGRAPHIE

[1] LINNAEUS, C. «Iter lapponicum». Plusieurs éditions suédoises, toutes posthumes. Edition anglaise par Sir James Smith, 1811 («Lachesis Lapponica»). Voir aussi JAMES, W. O. *Endeavour*, **16**, 107, 1957.

[2] HARE, F. K. *Geog. Rev., New York*, **40**, 615, 1950; *Geog. Studies, London*, **1**, 4, 1954; *Canada, Dept. Mines Tech. Surv., Geog. Branch*, mém. **6**, 1959.

[3] LAVRENKO, E. M. et SOCHAVA, V. B. (Publié par). Растительный покров СССР (Couverture végétale de l'URSS). 2 vols., texte de Геоботаническая Карта СССР (Carte géobotanique de l'URSS), par les mêmes éditeurs (1954). Académie des Sciences de l'URSS, Moscou et Léningrad. 1956.

[4] BROWN, R. J. E. *Arctic*, **13**, 163, 1960.

[5] COOMBS, D. B. *Geog. Bull., Ottawa*, **6**, 1, 1954.
HUSTICH, I. *Acta Geog., Helsingf.*, **16**, Partie 1, 1957.
SJÖRS, H. *Arctic*, **12**, 2, 1959; *Bull. Nat. Mus. Can.*, **171**, 1, 1961; *ibid.* (En préparation).

[6] DRURY, W. H. *Contr. Gray Herb. Harv.*, **178**, 1956.

[7] ALLINGTON, K. R. *McGill Sub-Arctic Res. Pap., Montreal*, 7, 1959 (Thèse). Voir aussi [2].

[8] GALKINA, E. A. Dans [3], Vol. II, p. 553.

[9] RUUHIJARVI, R. *Ann. bot. Soc. «Vanamo», Helsingf.*, **31**, Pt. 1, 1960.

[10] DU RIETZ, G. E. *Svensk bot. Tidskr.*, **43**, 274, 1949; *Vegetatio, Haag*, 5–6, 571, 1954.

[11] LUNDQVIST, G. *Sveriges geol. Unders.*, **Ca21**, 1951.

[12] CAJANDER, A. K. *Acta for. fenn.*, **2**, 1913.
MALMSTRÖM, C. *Medd. Skogsförsöksanst. Stockh.*, **20**, 1923.
KOTILAINEN, M. J. *Wiss. Veröff. Finn. Moorkulturver.*, **7**, 1928; *ibid.*, **19**, 1951.
PAASIO, I. *Acta. for. fenn.*, **39**, 1933.
SJÖRS, H. *Ark. Bot.*, 33A, Partie. 6, 1946; *Acta phytogeogr. Suec.*, **21**, 1948; *Bot. Notiser*, 1950, 173, 1950; *Oikos*, **2**, 241, 1950.
GORHAM, E. *Quart. Rev. Biol.*, **32**, 145, 1957.

[13] GRANLUND, E. *Sveriges geol. Unders.*, **C 373**, 1932.

[14] RATCLIFFE, D. A. et WALKER, D. *J. Ecol.*, **46**, 407, 1958.

[15] H. E. WRIGHT et M. L. HEINSELMAN. Information non publiée.

[16] HAMELIN, L.-E. *Cahiers Géog., Québec*, **2**, 87, 1957.

[17] AUER, V. *Acta for. fenn.*, **12**, Partie. 2, 1920.

[18] LUNDQVIST, G. *Geol. Fören. Stockh. Förh.*, **73**, 209, 1951.

[19] PORSILD, A. E. *Geog. Rev.*, **28**, 46, 1938.

[20] MALMSTRÖM, C. *Medd. Skogsförsöksanst. Stockh.*, **26**, 1, 1931.

Le positronium

par F. F. HEYMANN

Le positronium est un complexe extrêmement éphémère d'un électron avec un positron. Certaines de ses propriétés ressemblent à celles de l'hydrogène, et à ce titre on peut le considérer comme l'élément le plus léger de tous. Ainsi, il réagit avec les halogènes en donnant des halogénures apparentés à ceux de l'hydrogène, et à chaque raie de son spectre optique correspond une raie ayant la moitié de la longueur d'onde dans le spectre de l'hydrogène. Le positronium unit intimement la physique et la chimie et son étude requiert les disciplines des deux. Le présent article brosse un tableau de l'historique et de l'état actuel de cette recherche.

POSITRONS ET ÉLECTRONS

L'équation ondulatoire de Schrödinger, qui prévoit qu'une particule élémentaire doit manifester un caractère ondulatoire, ne s'applique qu'au cas où la vitesse de la particule est négligeable par rapport à celle de la lumière. En 1930, P.A.M. Dirac élaborait une équation d'onde où il était tenu compte des conséquences de la théorie de la relativité restreinte; des prédictions qui en résultèrent, l'une des plus frappantes était l'hypothèse de l'existence d'un électron chargé positivement. Deux ans plus tard, en effet, C. D. Anderson put observer dans une chambre de Wilson la trace de cette particule, connue sous le nom de positron.

L'on a pu déduire de la théorie de Dirac et de l'électrodynamique quantique que les électrons et les positrons sont créés en paires dans certaines conditions appropriées — la chose a souvent été vérifiée par la suite — et, réciproquement, qu'une collision entre un positron et un électron peut amener l'annihilation des deux particules tandis que l'énergie liée à leur masse et leur mouvement est convertie en rayonnement électromagnétique sous forme de rayons gamma.

L'électron et le positron sont animés d'un mouvement rotatoire. On peut les considérer comme des charges électriques tournant sur elles-mêmes à la manière d'une toupie. En raison de leur rotation, ces deux particules possèdent chacune leur champ magnétique propre, un positron et un électron tournant dans le même sens induisent des champs de signes contraires. On désigne sous le nom de spin le moment angulaire inhérent de ces particules.

Comme le spin est un moment angulaire, il est régi par certaines règles quantiques bien déterminées, dont l'une des conséquences les plus importantes est que lorsqu'un électron et un positron sont très proches l'un de l'autre les axes de leurs spins sont parallèles ou anti-parallèles. Ces deux possibilités s'appellent respectivement l'état triplet et l'état singulet; il en sera souvent question dans cet article.

En se basant sur le principe de la conservation du moment angulaire, on peut prouver que si un positron et un électron s'annulent mutuellement au cours d'une collision de front dans l'état singulet, toute l'énergie se transforme en deux rayons gamma émis à 180° l'un de l'autre si la mesure est effectuée dans des coordonnées C.M. (coordonnées de centre de masse des particules initiales au repos). Si le déplacement relatif des particules est faible avant la collision — c'est d'ailleurs toujours le cas dans la présente discussion — l'énergie mise en jeu est pratiquement celle des masses de ces deux particules au repos. L'énergie de chaque rayonnement gamma s'élève à 0,511 MeV.

En cas de collision de front à l'état triplet, l'annihilation fournit trois rayons gamma situés dans le même plan des coordonnées C.M. et dont la somme d'énergies s'élève à 1,022 MeV tandis

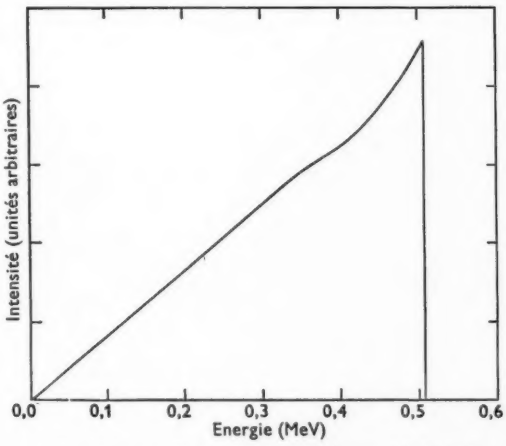


FIGURE 1 – *Spectre d'annihilation en triplet* [5].

que les énergies individuelles se répartissent statistiquement suivant un spectre continu (figure 1). Sur le même diagramme le rayonnement d'annihilation à l'état singulet présenterait une raie spectrale à 0,511 MeV.

Les collisions obliques ne provoquent presque jamais l'abolition des particules: les deux cas décrits plus haut sont les seuls qui revêtent une importance pratique.

La probabilité d'une collision d'annihilation à l'état triplet n'atteint pas le 1/1120ème de celle à l'état singulet. En d'autres termes, le nombre d'annihilations à l'état triplet ne participe que d'une façon très négligeable au niveau de destruction de positrons quand ces derniers entrent en collision libre avec un nuage d'électrons dont les individus ont leurs axes de rotation orientés au hasard. Et pourtant, comme on le verra plus loin, c'est précisément la petitesse même de cette probabilité qui permettra d'entreprendre l'étude du positronium.

LA NATURE DU POSITRONIUM

Dans la discussion relative à l'annihilation mutuelle d'un positron et d'un électron, on a tacitement supposé que les deux particules se rencontrent librement au cours d'une collision frontale amenant leur disparition. Certes, tout positron est fatalement appelé à se détruire avec un électron, mais pour les esprits curieux il est heureux de voir que le positron vient souvent à sa fin par une voie détournée.

Ainsi, il arrive qu'un positron se déplaçant parmi les molécules d'un gaz en arrache un électron et s'y fixe. Dans le langage classique on dira que le doublet électron-positron tourne autour de leur centre de masse commun maintenu en équilibre dynamique entre leur attraction électrostatique et la force centrifuge résultant de leur mouvement rotatoire. Il est tentant de comparer cette structure à un atome; elle ressemble beaucoup à l'atome d'hydrogène où l'électron et le proton, environ deux mille fois plus lourd que le positron, tournent autour de leur centre de masse commun. Ce pseudo-atome contenant un électron et un positron porte le nom de positronium.

Il convient de souligner que la formation d'états liés n'a rien de rare. Ce phénomène joue un rôle capital dans l'étude de l'annihilation des positrons. On a la preuve expérimentale que 30% de tous les positrons lents présents dans un gaz forment effectivement des atomes de positronium avant leur annihilation.

Selon l'orientation initiale de l'axe de rotation de l'électron et du positron, le positronium peut affecter la forme d'un triplet ou d'un singulet. A partir de considérations statistiques on peut prévoir que l'état triplet est trois fois plus probable que l'autre.

Bien que le positronium soit stable, du fait qu'on doit y fournir de l'énergie pour en séparer les particules, le positron et l'électron finiront quand même par se détruire mutuellement et le positronium a une vie moyenne prévisible. Dans le cas de l'état singulet elle est d'environ $1{,}25 \times 10^{-10}$ seconde, avec la répartition habituelle exponentielle inverse des durées de vie individuelles. Comme on l'a vu précédemment, la probabilité de l'annihilation à l'état triplet n'atteint que le 1/1120ème de celle à l'état singulet, et cette structure n'a donc qu'une vie moyenne d'environ $1{,}4 \times 10^{-7}$ seconde. Ces durées peuvent paraître infiniment réduites, mais à l'échelle atomique elles sont très longues. Il est vrai que la vie moyenne du positronium singulet permet d'observer quelques-unes seulement de ses propriétés au moyen des techniques actuelles, mais un intervalle de 10^{-7} seconde suffit pour étudier la plupart des aspects physiques et chimiques du comportement du positronium à l'état triplet.

Le positronium possède plusieurs états excités dont on peut calculer l'énergie de façon très exacte, tout comme pour l'hydrogène. En fait, à part des différences de structure fine des niveaux provenant surtout de l'écart de masse et de moment angulaire entre les protons et les positrons, les niveaux énergétiques du positronium sont semblables à ceux de l'hydrogène atomique ramenés presque exactement à une échelle réduite diminuée de moitié. Par conséquent, l'énergie d'ionisation — l'énergie requise pour séparer le positron et l'électron du positronium non-excité — est 6,8 eV, soit la moitié de celle de l'atome d'hydrogène. En outre, à chaque raie du spectre optique de l'hydrogène correspond une autre raie dans le spectre du positronium au double de la longueur d'onde.

EXTINCTION DU POSITRONIUM TRIPLET

Dès sa naissance, l'atome de positronium entre en collision au hasard avec les molécules du gaz dans lequel il se meut, entraînant souvent des processus chimiques et semi-chimiques. Par exemple, on a présenté des preuves à l'appui de l'existence de composés chimiques tels que les halogénures de positronium.

L'effet observé le plus souvent, qui semble dû aux interactions du positronium et des molécules de gaz, est une réduction apparente de la vie

moyenne du positronium à l'état triplet par des processus connus sous le nom collectif de collisions d'extinction.

Le mode d'extinction le plus fréquent est sans doute celui où, lors d'une collision entre un atome de positronium et une molécule de gaz, le positron est annihilé directement par un électron de la molécule à l'état triplet. A première vue on pourrait s'attendre à ce que ce processus engendre un taux d'extinction comparable à celui de positrons libres se déplaçant dans le même gaz. Il n'en est rien parce que dans le cas du positronium le positron est plutôt protégé par l'électron, ce qui produit une réduction du taux d'annihilation d'environ un ordre de grandeur. Dans les gaz où ce phénomène est le processus majeur, on devrait donc s'attendre à trouver un degré d'extinction plutôt moindre.

On connaît deux groupes de gaz qui ont un pouvoir d'extinction très marqué. Dans le premier groupe, notamment NO et NO_2, la molécule contient un nombre impair d'électrons. On pense que dans ce cas l'extinction se manifeste lorsque le positronium, à l'état triplet échange son électron avec un électron isolé de la molécule au cours d'une collision, si cet électron est orienté convenablement pour donner un positronium singulet. Ce dernier s'annihile alors rapidement à sa vie moyenne de $1{,}25 \times 10^{-10}$ seconde.

On pense que l'autre groupe d'extincteurs gazeux puissants, les halogénures, forme des composés chimiques, tels que le chlorure de positronium analogues à l'acide chlorhydrique. Dans ce composé, au lieu d'errer librement d'une molécule à l'autre, le positronium est forcé de rester aux côtés des électrons de chlore, ce qui augmente beaucoup la probabilité d'une collision d'annihilation.

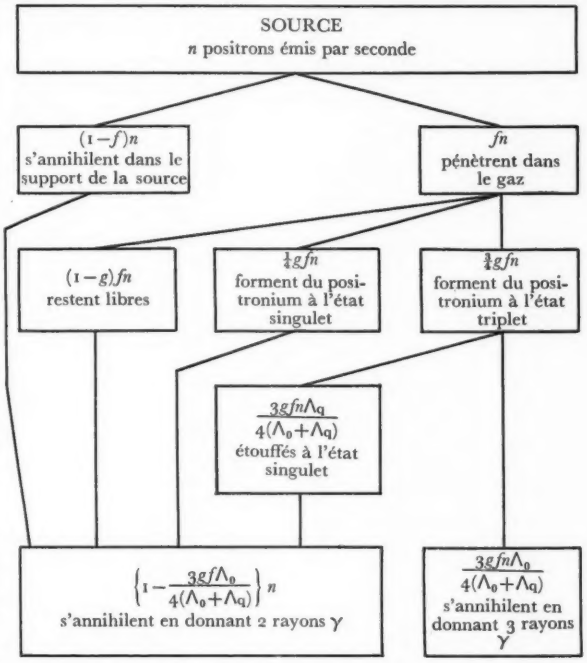


FIGURE 2 – *Possibilités d'existence de positrons dans un gaz* [6].

SORT DES POSITRONS DANS UN GAZ

Généralement, on obtient les positrons employés pour l'étude du positronium en plaçant dans le gaz d'observation une source radioactive telle que le ^{22}Na qui s'y désintègre en émettant des positrons excités. Au cours de collisions avec des molécules du gaz les positrons sont rapidement freinés à tel point qu'ils peuvent soit se dématérialiser soit former du positronium. Le temps de ralentissement est relativement court (10^{-9} seconde) si on le compare soit à la vie moyenne du positronium triplet ou à celle des positrons menacés d'annihilation par des collisions libres avec des électrons.

Le schéma de la figure 2 résume les possibilités d'existence réservées à un positron quand il se trouve dans un gaz. Le facteur f du diagramme représente la fraction des positrons émis qui parviennent à quitter la source et à pénétrer dans le gaz sans se dématérialiser au contact de la source ou de son support. Le facteur g représente la fraction des positrons entrés qui forme du positronium.

La quantité Λ_0 est la vitesse d'annihilation naturelle du positronium triplet, c'est-à-dire l'inverse de la vie moyenne en l'absence d'extinction; Λ_q est la vitesse d'extinction, c'est-à-dire l'inverse de la vie moyenne si l'extinction était le seul facteur responsable de la disparition du positronium triplet.

L'OBSERVATION DIRECTE DE LA VIE DU POSITRONIUM DANS UN GAZ

C'est véritablement un hasard heureux que la substance radioactive employée normalement pour étudier le positronium émette, pratiquement en même temps, le positron et un rayonnement γ de 1,36 MeV. La détection de ce rayonnement fournit ainsi un moyen commode pour enregistrer l'instant de la naissance d'un positron. On peut observer avec précision le moment de la dématérialisation en décelant un des rayonnements γ

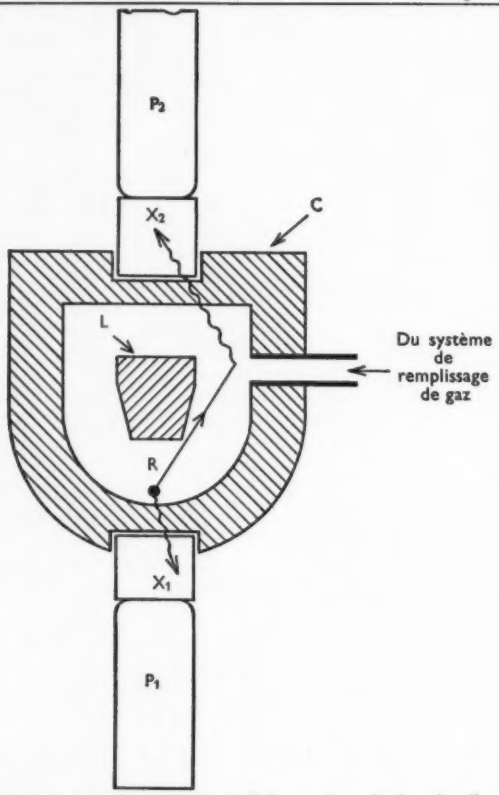


FIGURE 3 – *Appareil pour l'observation de la vie d'un positron.*

d'annihilation. La figure 3 représente un croquis de l'équipement classique employé pour effectuer des observations de ce genre. R est la source radioactive placée dans un récipient de haute pression C. Un cristal à scintillations X_1 décèle le passage d'un rayonnement γ de 1,36 MeV, et signale ainsi la naissance du positron. Le cristal est relié optiquement au photo-multiplicateur P_1 qui transforme l'éclair lumineux en impulsion électrique et l'amplifie. La fiche de plomb L empêche les radiations provenant de la source d'arriver au cristal X_2; toutefois, ce dernier est sensible à tout rayonnement provoqué par l'annihilation d'un positron dans le gaz. Relié au photo-multiplicateur P_2, ce cristal engendre une impulsion indiquant l'instant de l'annihilation. Les intervalles de temps individuels entre les impulsions définissant la «naissance» et la «mort» sont mesurés et enregistrés électroniquement. Au moyen de circuits électroniques rapides appropriés l'on peut mesurer ces intervalles de temps avec une précision d'environ 10^{-9} seconde, soit 1% de la vie moyenne du positronium triplet.

Dans des expériences de cette nature, les positrons qui donnent du positronium singulet immédiatement après leur ralentissement sont anéantis si vite que la limite du pouvoir de résolution de l'appareil permet uniquement d'enregistrer une suite rapide d'impulsions au lieu d'un intervalle fini. Par contre, le positronium triplet ainsi que les positrons qui s'annihilent lors de collisions libres avec des électrons, ont généralement une vie suffisamment longue pour être mesurée. On le verra par la figure 4 qui montre la courbe typique à coïncidences retardées. Cette courbe peut être analysée, par exemple, en trois constituants dont la partie exponentielle lente se manifeste sous la forme d'une ligne droite à l'échelle logarithmique; elle donne tous les renseignements nécessaires pour calculer la vie moyenne, et, partant, sa réciproque, la vitesse d'annihilation.

On peut distinguer expérimentalement les durées de vie provenant d'annihilations libres de celles dues au positronium triplet parce que leurs vitesses d'annihilation respectives varient différemment en fonction de la pression. Dans le cas d'annihilation libre, les positrons rencontrent les électrons des molécules gazeuses à une vitesse proportionnelle à la densité d'électrons. En d'autres termes, dans ces conditions, le taux de dématérialisation est fonction de la pression du gaz. Les résultats obtenus dans l'oxygène confirment cette hypothèse (figure 5). L'oxygène est un agent d'extinction si puissant que, même à pression réduite, la vie du positronium triplet est trop courte pour contribuer efficacement au constituant durable autrement que par l'annihilation de positrons libres. La courbe de vitesse d'annihilation en fonction de la pression est donc une ligne

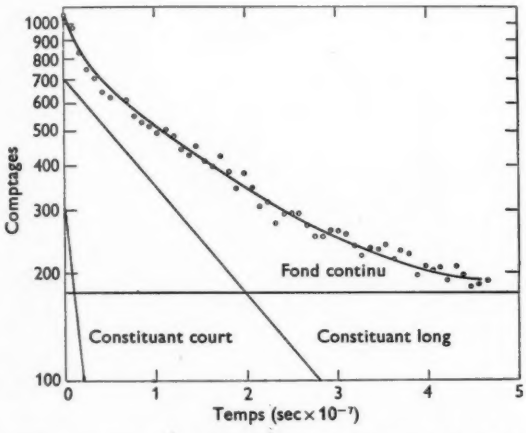


FIGURE 4 – *Courbe de coïncidence retardée dans le fréon* [4].

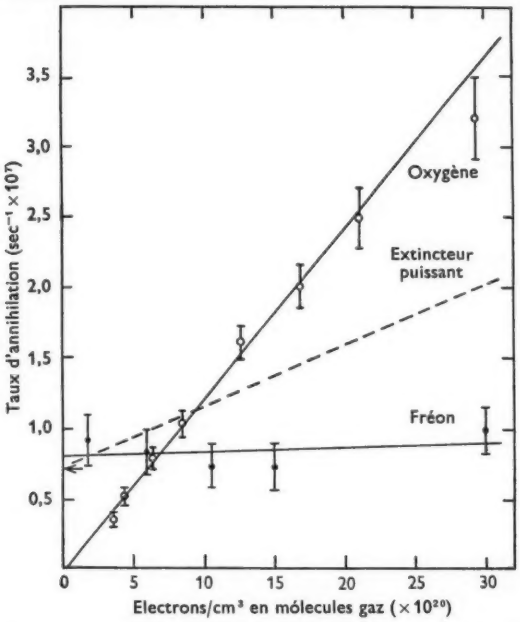


FIGURE 5 – *Taux d'annihilation en fonction de la pression dans l'oxygène et le fréon* [3]. *La flèche indique le taux à l'état triplet* [5].

droite passant par l'origine, ce qui correspond à la proportionnalité stricte.

Par contre, les gaz de la série du fréon, illustrés par le CCl_2F_2, ont la propriété remarquable d'absorber les positrons libres et de les anéantir rapidement de telle sorte que le positronium triplet reste le seul constituant de longue vie. En l'absence d'extincteur, la vie moyenne du positronium triplet est une grandeur inhérente de l'atome de positronium, indépendante de la pression. La figure 5 prouve qu'il en est bien ainsi.

En pratique, on doit généralement attribuer l'existence du constituant à longue vie à un mélange d'annihilations de positron libre et de positronium triplet. En l'occurrence, la courbe de vie contiendra un mélange de deux exponentielles. L'on pourra examiner séparément les deux en ajoutant au gaz à étudier soit un peu de fréon pour éliminer les positrons libres, soit une faible quantité d'un agent extincteur puissant comme le NO pour supprimer le positronium triplet.

La troisième ligne de la figure 5 démontre l'effet d'un gaz extincteur puissant. La variation de la durée de vie en fonction de la pression est telle que la vitesse d'annihilation comprend deux constituants additifs, à savoir, une vitesse constante due à la vie moyenne naturelle, à laquelle est

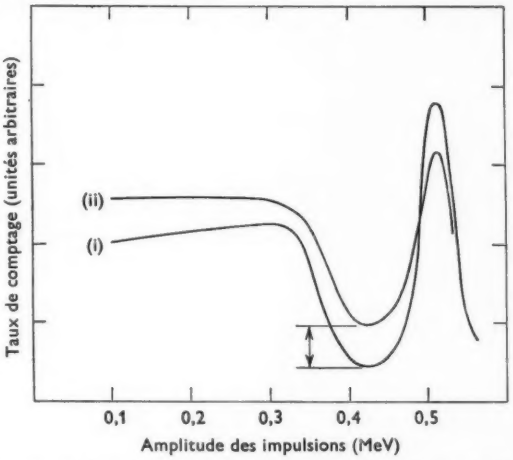


FIGURE 6 – *Amplitudes d'impulsions de spectres à scintillations produits par rayonnement d'annihilations.*

superposée une vitesse d'extinction proportionnelle à la densité d'électrons.

OBSERVATION DU SPECTRE DES RAYONS GAMMA

Comme on l'a montré précédemment (figure 1), l'annihilation d'un triplet s'accompagne de l'émission d'un rayonnement γ ayant un spectre continu, tandis que le spectre de l'annihilation d'un singulet est une forte raie. La différence entre les deux spectres permet de déterminer la concentration effective du positronium triplet dans un échantillon de gaz.

Quand un faisceau de rayons gamma monoénergétiques, par exemple ceux qui proviennent d'annihilations singulet, tombe sur un cristal à scintillations d'iodure de sodium, les impulsions électriques émanant d'un photomultiplicateur relié au cristal présente une répartition de hauteur correspondant à celle de la courbe (1) de la figure 6. Le pic assez pointu est produit par des rayons gamma ayant subi une absorption photo-électrique dans le cristal, et, en ce cas, la grandeur de l'impulsion lumineuse est directement proportionnelle à l'énergie du rayonnement gamma. Le long plateau de gauche provient surtout des rayons γ dispersés par des collisions Compton avec des électrons, et, dans ce cas, une fraction moindre et variable de l'énergie du rayonnement γ est transformée en lumière. Vu la complexité de la réponse d'un spectromètre à scintillations aux rayons γ, même s'il s'agit d'un faisceau monoénergétique, il n'est pas souvent commode de dégager des renseignements détaillés au sujet de

la répartition des énergies d'un spectre continu des rayons γ à partir de la répartition d'amplitude des impulsions. Toutefois, si l'on expose un tel appareil aux rayons γ produits dans une chambre où des annihilations singulet et triplet ont lieu toutes les deux, le spectre d'amplitude des impulsions résultant est modifié suivant la courbe (II) de la figure 6. L'élévation du niveau du creux indiquée par des flèches est un critère sensible du nombre d'annihilations à trois quanta.

Pour démontrer l'existence du positronium triplet, le plus simple est peut-être d'examiner la hauteur du creux produit par un rayonnement d'annihilation dans une chambre contenant une source de positrons et un gaz peu extincteur, puis de la comparer à celle qu'on obtient en y ajoutant une petite quantité de NO. Dans le dernier cas l'état triplet est fortement étouffé et presque tous les rayons γ d'annihilation se présentent sous la forme de rayonnement à deux quanta.

AUTRES MÉTHODES DE DÉTECTION

Les autres méthodes importantes utilisées pour identifier l'origine du rayonnement d'annihilation sont basées sur le fait que la multiplicité et les répartitions angulaires du rayonnement triplet diffèrent de celles du rayonnement singulet.

Ainsi, en exposant la chambre à deux compteurs à scintillations disposés diamétralement, on reçoit des impulsions de sortie coïncidentes provenant d'annihilations singulet. On s'est servi de ce fait indirectement pour observer le positronium triplet en suivant la décroissance de l'intensité du rayonnement à deux quanta lorsqu'on modifie les conditions de la chambre de façon à augmenter le rayonnement à trois quanta, par exemple en effectuant des expériences successives avec ou sans additions minimes de NO au gaz de la chambre.

On a vérifié directement que les annihilations triplet s'accompagnent de l'émission de trois rayons γ simultanés en plaçant le centre de trois compteurs à scintillations dans le même plan que le centre de la chambre de positronium, de telle sorte qu'on ne puisse tracer aucune ligne droite entre deux cristaux quelconque passant par la chambre. La coïncidence triple des impulsions reçues par ces compteurs indique une annihilation triplet. De cette manière, on a pu vérifier la coplanarité du rayonnement en constatant que le nombre d'annihilations diminue si l'on déplace un des compteurs de sa position de coplanarité.

Dans certaines des méthodes plus compliquées d'observation du positronium, on a utilisé simultanément plusieurs techniques de détection. Par exemple, on a effectué des mesures spectrales du positronium triplet pur en analysant la répartition d'amplitudes des impulsions d'un des compteurs à scintillations d'un équipage triple et ne comptant que les impulsions accompagnant les impulsions coïncidentes reçues par les deux autres.

EXTINCTION MAGNÉTIQUE

Quand on place un atome de positronium triplet dans un champ magnétique il arrive, en raison de l'interaction du champ et des moments magnétiques de l'électron et du positron, que le sens de rotation d'au moins l'une des particules soit inversé temporairement. En l'absence d'influences extérieures il existe donc une forte probabilité, suivant l'intensité du champ magnétique, de trouver du positronium singulet là où il n'y avait au début qu'un échantillon de positronium triplet. Dans le langage de la mécanique quantique, on dira que la présence du champ magnétique provoque le mélange de l'amplitude de l'état ayant l'unité de moment angulaire et le nombre quantique magnétique zéro (une certaine fraction du positronium triplet) avec celle de l'état ayant un moment angulaire zéro (positronium singulet). Pendant cette fraction de temps où l'atome de triplet original se comporte comme un atome de singulet, il est évident que la probabilité de son annihilation rapide aura augmenté fortement et que la vie moyenne de l'état triplet aura effectivement diminué. En d'autres termes, le positronium triplet peut s'annihiler dans un champ magnétique selon le mode à deux quanta caractéristique de l'état singulet, tandis que le champ magnétique absorbe tout déséquilibre de moment angulaire nécessaire pour satisfaire les lois de la conservation.

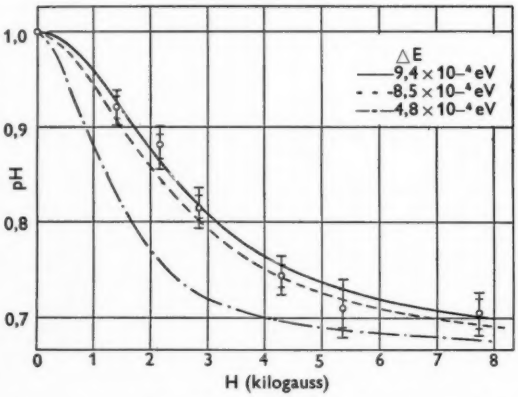


FIGURE 7 – *Extinction de l'état triplet par un champ magnétique* [2]. *Les diverses courbes correspondent à des interprétations différentes.*

Quand on place une source de positrons dans un échantillon de gaz, la concentration de positronium triplet obtenue atteint un équilibre dynamique quand la vitesse de sa formation à partir de positrons fraîchement émis est compensée par la vitesse de sa perte due à son annihilation. Toute réduction de la vie moyenne entraîne par conséquent une réduction de la concentration. On a tenu compte de ce fait lors de l'observation de l'extinction magnétique; pour mesurer l'intensité du spectre d'annihilation du triplet on a utilisé la méthode de détermination de la hauteur du creux. La figure 7 montre une courbe typique de la vitesse d'annihilation en triplet en fonction du champ magnétique: ces observations concordent parfaitement avec les calculs théoriques établis.

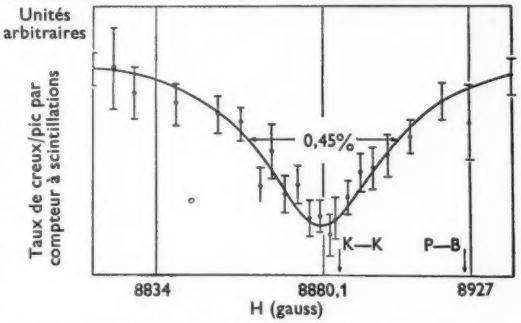


FIGURE 8 – *Extinction du niveau $m = \pm 1$ par un champ à haute fréquence* [1]. *P—B est la position du minimum calculée suivant la théorie électrodynamique supérieure. K—K est la position du minimum calculée en tenant compte de corrections d'ordre supérieur.*

NIVEAUX D'ÉNERGIE ET SPECTRE OPTIQUE

Si le positronium triplet était créé à l'état excité, il y aurait une probabilité incontestable de l'émission d'une de ses raies spectrales optiques caractéristiques, à condition que la vie moyenne en fonction de la désexcitation par émission optique soit brève par rapport à la vie moyenne en fonction de l'annihilation directe dans l'état excité. En fait, c'est le cas pour la raie analogue à la raie α Lyman de l'hydrogène atomique. Dans le spectre du positronium cette raie a une longueur d'onde d'environ 2 430 Å. Bien que ce soit le double de la longueur d'onde de la raie de l'hydrogène, la raie se situe quand même assez loin dans l'ultra-violet, ce qui complique quelque peu sa détection. De plus, la concentration de positronium disponible, en pratique, est extrêmement petite en comparaison avec la concentration de gaz typique utilisée dans les travaux de spectroscopie: on ne devrait donc pas s'attendre à déceler plus qu'un photon par quelques secondes dans une expérience classique de laboratoire. Bien qu'on ait souvent essayé de découvrir cette raie on n'a pas encore obtenu de résultat précis.

Même si l'on n'a pas encore pu observer de raie optique dans le spectre du positronium, on se trouve cependant dans une situation expérimentale telle qu'on a pu observer certains détails de la structure fine des raies grâce à l'effet Zeeman.

On constate que dans un champ magnétique les raies spectrales sont généralement divisées en constituants dont les longueurs d'onde varient très peu. La raison en est que le champ magnétique provoque la décomposition des divers niveaux d'énergie de l'atome en plusieurs constituants très rapprochés correspondant aux valeurs du nombre quantique magnétique. En irradiant les atomes au moyen d'un champ électromagnétique de haute fréquence superposé au champ magnétique statique, on arrive à induire des transitions entre ces sous-niveaux quand la fréquence correspond aux différences d'énergie en jeu.

Dans une série d'expériences remarquables, M. Deutsch et S. C. Brown ont effectivement observé ce procédé de la façon suivante: une chambre à positronium ayant la forme d'une cavité résonante à micro-ondes fut placée dans un champ magnétique statique suffisamment fort pour assurer pratiquement l'extinction magnétique totale. Dans ces conditions, comme nous l'avons signalé plus haut, presque tout le positronium triplet ayant le nombre quantique magnétique zéro est presque complètement étouffé. En appliquant alors à la cavité un champ à haute fréquence on constate une nouvelle extinction (figure 8) à la valeur du champ statique qui a pour effet de permettre la scission du niveau convenable de manière que le champ à haute fréquence puisse induire des transitions des sous-niveaux ayant le nombre quantique magnétique ± 1 au sous-niveau ayant le nombre quantique magnétique 0.

La position du minimum de cette courbe concorde de façon très précise avec la valeur calculée à partir de données électrodynamiques quantiques si l'on y incorpore des considérations théoriques raffinées.

Cette expérience est tout à fait remarquable sous tous les rapports, et elle est à comparer à la célèbre expérience de Lamb-Retherford sur la scission de l'état fondamental de l'atome d'hydrogène, comme étant l'une des expériences de haute précision qu'il faut effectuer pour prouver

l'exactitude de quelques phénomènes abstrus d'ordre supérieur dans l'électrodynamique.

CONCLUSIONS

Dans le cadre forcément restreint du présent article l'auteur n'a pu qu'esquisser les points saillants de l'étude du positronium. Il espère au moins qu'il a réussi à montrer que l'étude détaillée du sort d'un positron au sein de la matière présente bien plus de points d'intérêt qu'on aurait pu croire à l'origine; en effet, à partir de la théorie élémentaire de Dirac sur l'annihilation de positrons par des électrons lors de collisions de front, nous avons assisté à la formation transitoire d'un complexe quasi-atomique: le positronium.

L'étude expérimentale du comportement du positronium est passionnante peut-être précisément parce qu'elle permet au physicien nucléaire de s'occuper de chimie et de spectroscopie en utilisant ses compteurs à scintillations. Dans ce domaine, la microchimie a été poussée en quelque sorte jusqu'à sa limite ultime puisqu'on a pu observer le temps de réaction d'atomes réagissant individuellement.

BIBLIOGRAPHIE

[1] DEUTSCH, M. et BROWN, S. C. *Phys., Rev.* **85**, 1047, 1952.
[2] DEUTSCH, M. et DULIT, E. *Ibid.*, **84**, 601, 1951.
[3] DEUTSCH, M., DULIT, E. et PRIMAKOFF, *M.I.T.L.N.S.E. Prag. Rep.*, 131, le 31 mai 1951.
[4] DUFF, B. G. Communication privée.
[5] ORE, A. et POWELL, J. L. *Phys. Rev.*, **75**, 1696, 1949.
[6] OSMON, P. E. Thèse, Université de Londres, 1960.

Revue des livres

PHYSIQUE

FIERZ, M. et WEISSKOPF, V. F., publié par: *Theoretical Physics in the Twentieth Century: a memorial volume to Wolfgang Pauli*. Pp. x+328. Interscience Publishers Inc., New-York; Interscience Publishers Ltd., Londres. 1960. 72s.

Ce recueil de douze articles, comprenant la bibliographie de toutes ses publications connues, devait servir de cadeau pour le 60e anniversaire de Pauli; mais, son décès étant survenu dans l'intervalle, c'est maintenant un volume commémoratif. Ces comptes rendus de physique contemporaine montrent que dans presque tous ses aspects, structure moléculaire exceptée, Pauli a eu une influence décisive. Il s'intéressait surtout aux problèmes fondamentaux et possédait l'imagination, le courage et la compétence technique nécessaires à leur étude. Citons seulement le principe d'exclusion, le neutrino, les matrices «spin» de Pauli et l'électrodynamique quantique dont il formula la théorie générale. Plusieurs chapitres sur l'historique, ceux de Kronig et Van der Waerden en particulier, font un exposé remarquable de questions d'importance primordiale et montrent beaucoup mieux qu'une série d'articles conventionnels la façon bizarre dont se font les découvertes vraiment fondamentales. Tout scientifique possédant les rudiments des sciences physiques suivra sans difficulté la majeure partie de l'ouvrage. C. A. COULSON

LANDSBERG, P. T.: *Monographs in Statistical Physics and Thermodynamics*, Vol. II, *Thermodynamics*. Pp. x+499. Interscience Publishers Inc., New-York et Londres. 1961. 109s.

L'auteur de ce volume est Professeur de Mathématiques appliquées au *University College* de Cardiff, ce qui explique en partie pourquoi la thermodynamique est à ses yeux «une des branches les plus abstraites de la physique». L'ouvrage arrive certainement à son but qui est de compléter les textes existants et nous aide à mieux comprendre le sujet mais il ne s'adresse pas au débutant. La thermodynamique est une science trop utile pour être omise, même dans les manuels élémentaires, mais elle demande à être présentée avec grande précaution. L'auteur admet que sa présentation ici n'a rien de conventionnel. Dans le premier des sept suppléments, il essaie d'expliquer les aspects les plus originaux de l'œuvre, tels que l'emploi des concepts de partage «diathermique» et «adiabatique». Les six autres renferment de nombreux points intéressants dont beaucoup sont importants, tout comme les problèmes posés en fin de chapitre. Pour les lecteurs avancés, beaucoup d'aspects familiers du sujet sont présentés avec originalité, bien que l'économie de la méthode ou la profondeur des résultats obtenus ne justifient pas toujours un tel écart des sentiers habituels. Une série de lectures dans cet ouvrage, pour ceux qui possèdent de bonnes connaissances de thermodynamique statistique courante, rendra service aux physiciens théoriciens et approfondira leur expérience.

A. R. UBBELOHDE

DEAN, J. A.: *Flame Photometry*. Pp. VIII+341. McGraw-Hill Book Co. Inc., New-York; McGraw-Hill Publishing Co. Ltd., Londres. 1960. 89s.

Ce volume fait partie d'une série d'ouvrages de chimie avancée et s'adresse principalement à ceux qui emploient la photométrie à flamme comme méthode d'analyse. Il rendra grand service à ce titre.

L'étude des divers éléments, destinée à être particulièrement utile au lecteur, est complète et détaillée. Il y a beaucoup de matériaux nouveaux et la présentation est systématique et ordonnée. On remarquera les travaux du Professeur Dean lui-même sur l'extraction des métaux au moyen de solvants organiques avant évaluation par la photométrie à flamme et sur la sensibilité accrue obtenue avec ces solvants dans la flamme. Le gain de sensibilité semble être dû en partie à l'accroissement résultant de la taille de la flamme, ce qui indique un remplissage insuffisant du monochromateur en temps normal, mais le remède n'est pas suggéré.

Les chapitres sur les instruments méritent quelques critiques. Les effets

attribués à la largeur de la fente sont plutôt vagues. Une table (9-1) destinée à illustrer le pourcentage d'accroissement du fond de flamme selon la largeur de la fente semble prouver l'inverse. D'autres anomalies ont tendance à gâcher ces sections particulières de l'ouvrage, mais le lecteur courant n'y trouvera pas moins beaucoup de points intéressants et de valeur.

R. L. WARREN

BIRD, R. B., STEWART, W. E. et LIGHTFOOT, E. N.: *Transport Phenomena.* Pp. XXI + 780. John Wiley and Sons Inc., New-York et Londres. 1960. 110s.

Ce volume traite du déplacement de quantité de mouvement, d'énergie et de masse, c'est-à-dire de matière, dans les liquides. Les analogies existant entre ces phénomènes, au sens formel et physique, sont exploitées à fond bien qu'aucune analogie n'existe, naturellement, dans le cas du déplacement d'énergie rayonnante qui est également traité.

Le thème, logiquement développé, est traité rigoureusement et devance de beaucoup, à ce point de vue, la plupart des textes destinés aux ingénieurs chimistes dans ce domaine. Le point de vue est peut-être intransigeant et assez difficile à suivre et une série de notes explicatives serait probablement nécessaire aux étudiants pour le comprendre à fond.

La tendance actuelle des programmes de science appliquée dans les universités américaines à être ultra-scientifiques se retrouve ici dans le fait que les sujets ne pouvant être traités analytiquement, tels que le transfert de chaleur aux liquides bouillants, sont évités. Il nous semble que cette tendance peut être exagérée et que nous devrions mettre au point des méthodes plus effectives d'enseignement pour développer l'intuition et l'analyse qualitative des problèmes.

P. V. DANCKWERTS

CHIMIE

VANCINI, C. A.: *La Sintesi dell'Ammoniaca.* Pp. XXVII + 1075. Editore Ulrico Hoepli, Milan. 1961. 12 000 lires.

De nombreuses variations ont été apportées au plan des fabriques d'ammoniaque depuis sa première synthèse commerciale et des procédés très divers sont maintenant en usage pour la production et la purification des grandes quantités d'hydrogène nécessaires. Ce volume fait l'étude technique et scientifique complète de ces procédés. On trouvera les méthodes nouvelles de production d'hydrogène comme la régénération du méthane par la vapeur et l'oxydation partielle sous pression, aussi bien que les procédés éprouvés basés sur le coke, le gaz de four à coke et l'électrolyse de l'eau. Les méthodes de purification récentes, telles que l'extraction de CO_2 par des solutions chaudes de carbonate de potassium sont indiquées également, sauf le procédé italien *Vetrocoke*, exception surprenante. Notons aussi les procédés à basse température de production d'oxygène, d'azote et des mélanges d'azote et d'hydrogène. Le plan des citernes à pression et des dispositifs de synthèse de l'ammoniaque est bien traité dans l'ensemble. Les directeurs et constructeurs de fabriques d'ammoniaque trouveront le volume très utile, tout comme ceux qui ont affaire à la production en grand de l'hydrogène.

T. J. P. PEARCE

KAMLET, M. J., publié par: *Organic Electronic Spectral Data.* Vol. I (1946–52). Pp. XIV + 1208. Vol. II (1953–55), publié par H. E. UNGNADE, pp. X + 919. Vol. I, 215s.; Vol. II, 132s. Interscience Publishers Inc., New-York; Interscience Publishers Ltd., Londres. 1960.

Les spectres visibles et ultra-violets des substances organiques ont fait l'objet d'études poussées ces dernières années. L'organicien a tiré grand parti de l'interprétation théorique des spectres et, en particulier, de la corrélation empirique de ceux-ci avec la structure moléculaire. Des spectrophotomètres commodes et exacts ont permis de faire paraître une quantité toujours croissante de spectres et un groupe de plus de cinquante chimistes a entrepris la publication de tous les spectres connus.

Les deux volumes en question traitent des années 1946–52 et 1953–55 et les chefs de publication et collaborateurs méritent d'être félicités pour avoir entrepris une tâche aussi écrasante. La masse de renseignements cités rendra grand service à tous les organiciens.

Les composés sont classés selon leur formule moléculaire comme dans les *Chemical Abstracts*. Les tables donnent le nom du composé, le solvant employé, la longueur d'onde des maxima d'absorption, le coefficient d'extinction de chaque bande et une note bibliographique sur l'article original.

R. E. RICHARDS

WOLSTENHOLME, G. E. W. et O'CONNOR, C. M., publié par: *Ciba Foundation Symposium on Quinones in Electron Transport.* Pp. XII + 453. J. & A. Churchill Ltd., Londres. 1961. 60s.

La découverte, par le Professeur R. A. Morton et ses collaborateurs à l'Université de Liverpool, ainsi que par l'équipe du Professeur D. E. Green à l'Université du Wisconsin, des composés de la série ubiquinone (coenzyme Q) a donné un élan nouveau à l'étude des diverses fonctions des lipides dans le déplacement des électrons et dans les phénomènes associés de phosphorylation dans les mitochondries. Nous sommes reconnaissants aux dirigeants et organisateurs de cette Conférence, tenue en 1960, d'avoir ainsi permis aux représentants de nombreux groupes de recherche d'exposer et d'étudier ensemble les découvertes initiales, celle des constitutions chimiques et les nombreuses ramifications actuellement poursuivies.

Outre les contributions d'autorité directement reliées au titre, les aspects du sujet traités comprennent: les mécanismes chimiques *in vitro* de la phosphorylation par oxydation, les rôles possibles des quinones (la vitamine K comprises) et des dérivés chromanés apparentés dans la phosphorylation, la signification de la plastoquinone (quinone de Kofler) dans le déplacement d'électrons photosynthétique et la phosphorylation, la biosynthèse des portions polyisoprénoïdes et quinoïdes des ubiquinones, ainsi que l'évaluation critique des méthodes employées pour ces travaux.

M. B. THORN

BIOCHIMIE

GREENBERG, D. M., publié par: *Metabolic Pathways*, Vol. I (2e édition de *Chemical Pathways of Metabolism.* Pp. XV + 572. Academic Press Inc., New-York; Academic Press Inc. (London) Ltd., Londres. 1960. 121s. 6d.

Ce livre intéressera considérablement le nombre, sans doute élevé, de ceux qui désirent consulter un ouvrage de référence très bien renseigné sur les connaissances actuelles concernant les diverses avenues du métabolisme animal, végétal et micro-organique. Cette seconde édition a été pratiquement refaite. Des quatorze auteurs ayant contribué à ce premier volume, quatre seulement avaient pris part à la première édition. Dans les sept ans écoulés depuis, les connaissances du métabolisme intermédiaire ont crû très rapidement. De nombreuses lacunes ont

été comblées et de nombreux enchaînements métaboliques nouveaux et inattendus ont été découverts. Parmi les questions traitées, citons: l'énergie libre et l'entropie dans le métabolisme (A. B. Pardee et L. L. Ingraham), système mitochondrial d'enzymes, (D. E. Green et S. Fleischer), glycolyse (B. Axelrod), cycle de l'acide tricarboxylique (H. A. Krebs et J. M. Lowenstein), autres avenues du métabolisme des hydrates de carbone (B. Axelrod), métabolisme des hormones stéroïdes (L. T. Samuels) et caroténoïdes et vitamine A (G. Mackinney).

H. A. KREBS

GILMOUR, D.: *The Biochemistry of Insects*. Pp. XII+343. Academic Press Inc., New-York; Academic Books Ltd., Londres. 1961. 64s.

L'auteur s'est efforcé de faire l'étude chimique des insectes en tant qu'organismes plutôt que celle des réactions et y a réussi en rapportant les divers phénomènes biochimiques aux particularités de la physiologie et de la biologie de ces animaux. Le résultat se lit avec aisance.

Plus de la moitié du volume est consacrée aux divers aspects de la production d'énergie et ces chapitres montrent à quel point la plupart des phénomènes ressemblent à ceux du reste du règne animal, à part quelques différences importantes de détail dans la glycolyse et le cycle respiratoire. Le reste du volume s'occupe principalement du métabolisme intermédiaire des hydrates de carbone, lipides et composés azotés et passe en revue les constituants de la cuticule des insectes et les théories de son tannage.

L'ensemble constitue une revue critique extrêmement utile de la biochimie des insectes.

A. N. CLEMENTS

BOTANIQUE

HAGERUP, O. et PETERSON, V.: *Botanisk Atlas*, Vol. II. (Traduction anglaise de H. Gilbert Carter.) Pp. 299. Ejnar Munksgaard, Copenhague. 1960. D.kr. 76.

Ce volume est le jumeau du premier, des mêmes auteurs, passé en revue dans ces colonnes en juillet 1957. Il étend l'étude aux conifères et aux cryptogammes vasculaires avec le même plan et les mêmes mérites que précédemment. Les grossissements de dessins, omis dans la première partie, sont maintenant indiqués, ce qui augmente grandement l'utilité du volume. La moitié environ des espèces danoises de mousses et d'hépatiques sont illustrées et tous les lycopodes, prêles et conifères. Comme précédemment, il y a des dessins d'habitus (les arbres n'étant représentés que par de petits rameaux) tirés de spécimens récents et au besoin, des grossissements de détail. Le texte explicatif est nettement plus long que dans le premier volume et consiste surtout en la description de chacun des groupes illustrés donnée en danois et en anglais dans des colonnes parallèles. On trouve finalement une partie composée de conjectures phylogénétiques, portant surtout sur l'origine de l'habitus des graines, qui semble ne pas s'accorder parfaitement avec la nature positive de l'ouvrage en gros. La parution de ce second volume augmente considérablement la dette de tous les botanistes envers les auteurs.

W. O. JAMES

ZOOLOGIE

GRASSÉ, P.-P., publié par: *Traité de zoologie*. Vol. V, partie 2: *Bryozoaires, Brachiopodes, Chétognathes, Pogonophores, Mollusques*. Pp. 1168. Masson et Cie, Paris. 1960. Relié, 190 NF; broché, 180 NF.

Ce volume, le second de trois sur les invertébrés allant des Platyhelminthes et des Nématodes aux Arthropodes, maintient le niveau extrêmement élevé de qualité technique de ce magnifique traité, maintenant presque terminé. Les figures dans le texte, comme les planches, sont un modèle de clarté.

Les Bryozoaires sont étudiés très à fond dans un chapitre de près de 300 pages de Paul Brien, suivi d'un compte rendu d'Emil Buge sur les équivalents fossiles. Viennent ensuite des chapitres sur les Brachiopodes récents et fossiles de Paul de Beauchamp et Jean Roger respectivement, où les derniers travaux sur les courants alimentaires et l'embryologie sont bien présentés et la structure, la classification et l'évolution du groupe décrites à fond. La partie consacrée aux Chétognathes, de Paul de Beauchamp également, paraît un peu succinte et on aurait pu sans doute insister davantage sur la grande importance écologique de ces animaux dans le plancton marin universel.

Le chapitre de 100 pages environ sur le groupe relativement récent des Pogonophores a un intérêt spécial. L'auteur est A. V. Ivanov de l'Université de Léningrad, autorité reconnue sur la question et l'un des rares auteurs qui ne soit pas français. C'est le meilleur exposé général sur ce point et la structure fondamentale de ces animaux est présentée de façon semi-diagrammatique en deux planches en couleur admirables.

Le reste du volume, un peu plus de 500 pages, traite des mollusques à l'exception des Gastropodes, des Scaphopodes et des Céphalopodes qui seront étudiés au 3e volume. A. Portmann traite des caractères généraux de l'embranchement mais son oubli de noter les symétries diverses du corps et du manteau qui sont à la clé des grandes variétés de forme chez les mollusques porte à critique. E. Fischer-Piette et A. Franc étudient très suffisamment les Aplacophores et Polyplacophores tandis que les Monoplacophores sont passés en revue par H. Lemche et K. G. Wingstraad. P. Manigault étudie brièvement la coquille et A.Franc la grande classe des Bivalves. En tant que spécialiste de la question, il nous semble que les travaux modernes sont ici bien représentés et illustrés. Il n'existe certainement pas de meilleur compte rendu à l'heure actuelle. Alors que la classification de Pelseneer paraît révolue, la grande partie systématique renferme d'excellentes descriptions des groupes et familles. Finalement, les bivalves fossiles sont bien traités par Colette Dechaseaux.

Tous ceux qui s'intéressent à l'un quelconque de ces groupes feront bien de se procurer ou de s'arranger pour consulter cet ouvrage.

C. M. YONGE

TECHNOLOGIE

RYSHKEWITCH, E.: *Oxide Ceramics, Physical Chemistry and Technology*. Pp. VIII +472. Academic Press Inc., New-York; Academic Press Inc. (London) Ltd., Londres. 1960. $16.

Cet ouvrage repose sur le *Oxydkeramik der Einstoffsysteme* du même auteur paru en 1948 et renferme beaucoup de renseignements utiles. Les 68 premières pages font une introduction générale à la céramique oxydée; puis viennent des chapitres sur l'alumine (150 pages), la spinelle (23 pages), la magnésie, la glucine, la zircone, la thorine et la cérine sans compter une courte section sur la céramique à oxyde-métal et à oxyde-carbure. L'index des auteurs est complet et celui des sujets, suffisant. L'ouvrage semble s'adresser surtout à ceux qui ont affaire à l'étude des articles de céramique oxydée et rendra service comme source de renseignements et guide à la littérature sur le sujet.

R. W. DOUGLAS

Brèves notices bibliographiques

(Ces notices sont plus descriptives que critiques et sont destinées à donner une indication générale de la nature et de la portée des ouvrages.)

POWELL, J. L. et CRASEMANN, B.: *Quantum Mechanics*. Pp. x+495. Addison-Wesley Publishing Co. Inc., Reading, Mass. 1961. 74s.

Cette introduction à la mécanique quantique s'adresse aux étudiants avancés. Les fondements physiques de la question sont mis en relief mais la partie mathématique n'est pas oubliée. Il y a, entre autres, des chapitres sur l'origine de la théorie des quanta, l'équation de Schrödinger, les opérateurs et fonctions propres, la mécanique matricielle, la théorie des perturbations et les particules identiques.

GORTER, C. J., publié par: *Progress in Low Temperature Physics*, Vol. III. Pp. XII+495. North-Holland Publishing Co., Amsterdam. 1961.

Le Vol. III est, comme les précédents, une collection d'articles d'étude à l'intention des chercheurs. Citons seulement le titre de quelques chapitres: lignes tourbillonnaires dans l'hélium liquide II, par W. F. Vinen; nature de la transition λ dans l'hélium liquide, par M. J. Buckingham et W. M. Fairbank; progrès récents en supraconductivité, par K. W. Taconis; masers de l'état solide, par N. Bloembergen et quelques équilibres gaz-solides aux basses températures, par Z. Dokoupil.

WHITE, J. H.: *A Reference Book of Chemistry*. Pp. 302. University of London Press Ltd., Londres. 1960. 21s.

Volume destiné à compléter les manuels scolaires des grandes classes. On y trouve des définitions et explications de termes importants, la liste des réactifs et tests organiques et inorganiques et celle des réactions organiques. Les suppléments portent sur les soins d'urgence au laboratoire et donnent d'utiles renseignements.

HAMILL, W. H. et WILLIAMS, R. R., Jr.: *Principles of Physical Chemistry*. Pp. x+607. Oliver and Boyd Ltd., Edimbourg. 1960. 30s.

Ce volume, destiné aux étudiants universitaires, commence par la thermodynamique avant de passer à la chimie physique. Tous les aspects de ce dernier sujet sont traités dans les divers chapitres, notamment la première loi de la thermodynamique, l'équilibre chimique dans les systèmes gazeux, l'entropie et la troisième loi de la thermodynamique, les diagrammes de phases, la chimie nucléaire, la photochimie et la chimie des radiations.

GRADDON, D. P.: *An Introduction to Coordination Chemistry*. Pp. VII+111. Pergamon Press Ltd., Oxford. 1961. 25s.

Les progrès réalisés ces vingt dernières années sont traités dans ce livre qui comprend aussi un bref chapitre sur les débuts de la chimie de coordination. Il y a également des chapitres sur la polymérisation et la saturation des coordonnés, la stabilité des sels complexes et les carbonyles et complexes π. Le volume s'adresse principalement aux étudiants.

HAIS, I. M. et MACEK, K., publié par: *Handbuch der Papierchromatographie*, Vol. II, *Bibliographie und Anwendungen*. Pp. XXIV+726. Gustav Fischer Verlag, Iéna. 1960. DM 44.

Ce volume, le second de ce vaste traité sur la chromatographie sur papier est fait d'une bibliographie complète comprenant 10 290 ouvrages de la période 1943–56 principalement. On trouve d'abord une partie de généralités sur l'historique, la théorie et les techniques de la chromatographie proprement dite et la chromatographie pratique, les études générales et les ouvrages sur la question; puis une partie spécialisée faite de sections sur la chromatographie de groupes de composés tels que les phénols et corps apparentés, les acides organiques, les stéroïdes. Les sections sont elles-mêmes subdivisées en techniques et applications, et précédées de brefs paragraphes d'introduction. Le copieux index d'auteurs et de sujets occupe près de 200 pages.

Modern Chemical Processes, Vol. VI, par les rédacteurs de *Industrial and Engineering Chemistry*. Pp. 126. Reinhold Publishing Corporation, New-York; Chapman and Hall Ltd., Londres. 1961. 48s.

Cette série cherche à décrire les procédés de la technologie chimique américaine par l'étude de leurs principes, de leur outillage, de leur économie et de leur avenir. Parmi les techniques décrites citons: la manufacture des produits à base de silicone, l'emploi des réactifs de Grignard, la manufacture des agents spécialisés à activité de surface et celle des acrylates et méthacrylates.

WALKER, E. H.: *A Bibliography of Eastern Asiatic Botany*. Pp. XL+552. American Institute of Biological Sciences, Washington, D.C. 1960. $18,50 pour les particuliers et bibliothèques industrielles, $16,50 pour les membres de l'AIBS et toutes autres bibliothèques.

La première bibliographie, œuvre de E. D. Merrill et E. H. Walker, parue en 1938, allait jusqu'à 1936. Le volume actuel va jusqu'à 1958, tout en suivant le même plan. L'auteur explique que le Japon, et plus nettement encore la Chine, ne sont pas traités à fond à cause de la destruction pendant la guerre de plusieurs bibliothèques de Tokyo et de la mauvaise distribution des publications en Chine pendant cette période.

Non-convertible Coatings, publié sous la direction de The Oil and Colour Chemists' Association. Pp. 326. Chapman and Hall Ltd., Londres. 1961. 30s.

L'intention première du livre est d'aider les étudiants à préparer la partie des revêtements non-convertibles de l'examen municipal (*City and Guilds*) de technologie de la peinture. On espère cependant qu'en tant que revue des méthodes modernes, il rendra service aux employés de l'industrie. C'est le premier d'une série de six volumes et on y trouve des chapitres sur la nitrocellulose, les plastifiants, les lacques, l'acétate de cellulose, les résines-lacques thermoplastiques synthétiques et les vernis à l'alcool.

MCKENZIE, A. E. E.: *The Major Achievements of Science*, Vol. I, pp. XVI+368. Vol. II, pp. XII+195. Cambridge University Press, Cambridge. 1960. Vol. I, 30s. (édition scolaire 20s.); Vol. II, 17s. 6d. (édition scolaire 12s. 6d.).

L'auteur essaie de donner ici aux étudiants de lettres quelques notions scientifiques. Il passe en revue les grandes découvertes dans des chapitres intitulés «Circulation du sang», «Physique hors du laboratoire», «Théorie de la maladie par les microbes», et le cadre historique des XVIIe, XVIIIe, XIXe et XXe siècles. La direction de la pensée scientifique et le caractère des savants sont mis en relief. Le second volume se compose d'extraits, traduits au besoin, d'écrits de savants distingués.

Notes biographiques sur les collaborateurs

A. F. WAGNER
A.B., M.A., Ph.D.

Naquit à Jersey City, New Jersey, en 1922 et fit ses études à l'Université de Princeton où il reçut son doctorat ès-sciences en 1951. Il entra ensuite pour y faire des recherches chez *Merck & Co. Inc.* Il s'intéresse principalement à la synthèse des produits naturels et aux rapports entre leur structure et leur activité; il a participé à la première synthèse réussie de l'acide mévalonique.

K. FOLKERS
B.S., Ph.D.

Né à Decatur, Illinois, en 1906, étudia aux Universités d'Illinois et de Wisconsin où il reçut son doctorat ès-sciences en 1931. Il fit ensuite des travaux à *Yale University* jusqu'en 1934, date à laquelle il entra chez *Merck & Co. Inc.*; il est depuis 1956 Directeur exécutif de recherches fondamentales. Il s'est intéressé surtout à la chimie des agents thérapeutiques tels que les alcaloïdes, la vitamine B6 et l'acide pantothénique; ses travaux récents ont conduit à la découverte de l'acide mévalonique et il a fait l'étude chimique du groupe Q de coenzymes. Il a reçu la médaille Perkin de la *Society of Chemical Industry* et est Président élu de l'*American Chemical Society*.

SIR EDWARD BULLARD
M.A., Sc.D., F.R.S.

Né en 1907, étudia à *Clare College*, Cambridge. Il commença des recherches sous la direction de Lord Rutherford en 1929 sur la dispersion des électrons lents dans les gaz. En 1931, il aborda la géophysique et a fait des travaux expérimentaux sur la gravité, la sismologie et la mesure des courants de chaleur sur terre et sur mer. Il a dirigé le *National Physical Laboratory* de 1950 à 1955 et est actuellement Chargé de cours de Géophysique à l'Université de Cambridge. Il a beaucoup écrit sur l'origine du champ magnétique terrestre et sur la magnétohydrodynamique.

M. H. PIRENNE
M.A., Ph.D., Dr.Sc.

Naquit à Verviers en Belgique en 1912 et étudia à l'Université de Liège. De 1942 à 1945 il fit des travaux sur la vue au laboratoire de Sir F. C. Bartlett à Cambridge. De 1945 à 1948 il fit des recherches à l'Université de Londres et de 1948 à 1955 fut Maître de conférences principal de Physiologie à l'Université d'Aberdeen. Il est maintenant à l'Université d'Oxford où il est démonstrateur en physiologie. En 1957, il fut élu Vice-Président du Comité International de Photobiologie. Il a étudié surtout la physiologie de la vue et questions apparentées.

V. A. EYLES
D.Sc., F.R.S.E., F.G.S.

Né à Bristol en 1895, étudia à l'Université de Bristol. En 1920 il fut nommé géologiste au *Geological Survey of Great Britain* (section d'Ecosse) puis transféré à la section d'Angleterre en qualité de géologiste régional en 1945, poste qu'il occupa jusqu'à sa retraite en 1955. Il est membre fondateur de la *British Society for the History of Science* et fait partie de la Société américaine d'histoire scientifique. Il a fait paraître des articles sur l'histoire de la géologie et a donné des cours sur le sujet au Département d'Histoire et de Philosophie scientifiques à *University College*, Londres de 1951 à 1956 ainsi qu'aux Universités de Californie et d'Illinois.

H. SJÖRS
Fil. dr.

Né en Suède en 1915, fit ses études à l'Université d'Upsala où il devint Maître de conférences d'Ecologie végétale en 1948. Il passa ensuite trois ans à l'Université de Lund et depuis 1955 occupe le poste de *laborator* en botanique forestière à l'Ecole de Sylviculture de Stockholm. Ses travaux ont porté surtout sur l'écologie de la végétation des marais et marécages. Il a aussi fait paraître des études sur la phytogéographie scandinave, les sols d'humus et sur les forêts boréales façonnées par des types anciens d'exploitation rurale et s'intéresse activement à la préservation de la nature.

F. F. HEYMANN
B.Sc.(Eng.), Ph.D.(Eng.)

Né en Afrique du Sud en 1924, fit ses études à l'Université du Cap de 1940 à 1945. Fit partie du personnel universitaire jusqu'en 1947, date à laquelle il vint en Angleterre pour entrer chez Metropolitan-Vickers Ltd à titre de physicien de recherche industrielle. Il enseigne à *University College*, Londres, où il est chargé de cours de physique depuis 1950. Il a fait paraître de nombreux travaux sur les accélérateurs de particules et sur la physique nucléaire des hautes énergies. Il s'occupe depuis trois ans de recherches sur le positronium.